



Tiago Honrado Rio Pereira

Licenciado em Engenharia dos Materiais

**Avaliação de emissões de
nanopartículas resultantes dos
processos de soldadura TIG e SER.**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia da Soldadura

Orientadora: Prof. Doutora Rosa Maria Mendes Miranda (DEMI, FCT/UNL)

Co-Orientador: Prof. Doutor João Fernando Pereira Gomes (ADEQ, ISEL/IPL)

Presidente

Arguente

Vogais



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2013

COPYRIGHT

Avaliação de emissões de nanopartículas resultantes dos processos de soldadura TIG e SER

©Tiago Honrado Rio Pereira, FCT-UNL, 2013

A Faculdade de Ciências e Tecnologias e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi possível, com a colaboração de várias pessoas, às quais dirijo os meus mais sinceros agradecimentos.

Ao meu colega engenheiro de soldadura Miguel Bento, que foi imprescindível na realização dos ensaios, assim como na discussão de ideias sobre os nossos temas e análise de resultados.

À minha orientadora Professora Doutora Rosa Miranda, que esteve sempre disponível e ajudou de forma incansável na realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador, Professor Doutor João Gomes, que também esteve sempre disponível para ajudar na realização do trabalho, assim como o auxílio prestado para o bom funcionamento dos dispositivos utilizados.

À Professora Doutora Patrícia Carvalho do Microlab do IST, pela disponibilidade e ajuda prestada na análise TEM e de EDS.

Ao Eng. Pedro Lança, pela disponibilização dos materiais de adição essenciais à realização deste trabalho.

Ao Eng. Bruno Salgueiro, pela disponibilização de uma grande quantidade de material de base essencial à realização deste trabalho.

Aos Srs António Campos e Paulo Magalhães, pela assistência prestada durante a parte experimental deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas de faculdade, Susana Marques, Anselmo Gomes e Gonçalo Coelho, pelo apoio que sempre mostraram e continuaram a mostrar, antes, durante, e após a realização deste trabalho.

Aos meus amigos, Miguel Alberto, Bruno Ferreira, João Cício Carvalho, Rui Velindro, André Abreu, Tiago Ferreira, João Silva e Rolando Henriques, pela boa companhia que prestaram, e que me motivaram bastante durante este período.

À minha família, que me tentou sempre motivar para o avanço desta dissertação, e obtive sempre um grande apoio dela.

À Diana Alves, por ter estado presente como mais ninguém esteve na recta final desta dissertação.

RESUMO

Existem vários processos de soldadura na indústria metalomecânica, sendo que os mais utilizados são os processos por fusão. Estes libertam fumos que contêm nanopartículas nocivas para a saúde dos seres humanos. Dois dos processos de soldadura actualmente mais utilizados são: *Tungsten Inert Gas* (TIG) e Soldadura por Eléctodos Revestidos (SER).

Os objectivos deste estudo foram: a análise de partículas libertadas durante estes processos e a sua caracterização, em termos da concentração e composição, em função dos parâmetros de soldadura eléctricos (corrente e tensão), e metalúrgicos (diferentes materiais de base e de adição).

Os ensaios foram efectuados com materiais de base utilizados frequentemente na indústria, como sejam o aço inox e o aço ao carbono, tal como nos materiais de adição, onde se utilizaram os mesmos aços, bem como alterações no revestimento dos eléctrodos, no caso do processo SER. Simultaneamente, recolheram-se nanopartículas que posteriormente foram analisadas e caracterizadas por microscopia electrónica de transmissão (TEM).

As nanopartículas metálicas têm grande capacidade de deposição nos alvéolos pulmonares, e podem provocar problemas respiratórios para os trabalhadores envolvidos na execução de operações de soldadura.

PALAVRAS-CHAVE:

Nanopartículas;

Tungsten Inert Gas(TIG);

Soldadura por Eléctodos Revestidos (SER);

Soldadura por fusão;

Geração de fumos.

ABSTRACT

The mechanical industry uses many welding processes to join metals, and most of them are fusion based. These processes generate fumes that contain toxic nanoparticles that are harmful for the human being. From all the welding processes, the following are among the most used: Tungsten Inert Gas (TIG) and Manual Metal Arc (MMA).

The main objective of this study was the analysis of the released particles during the welding operation welding, and their characterization, in terms of concentration and composition, as well as the electrical parameters (current and voltage), and metallurgical (different base materials and consumables).

Welding tests were performed with base metals most frequently used in the industry, such as stainless steel and carbon steel, with the respective welding consumables, as well as different shieldings in the electrodes, in the MMA process. Simultaneously, nanoparticles were collected and were later on analysed and characterized with Transmission Electronic Microscopy (TEM).

Metallic nanoparticles have a great capacity of deposition on the alveolar tract, and they can cause respiratory issues on the workers involved in the execution of welding operations.

KEYWORDS:

Nanoparticles;

Tungsten Inert Gas (TIG);

Manual Metal Arc (MMA);

Fusion Welding;

Fume Generation.

ÍNDICE

COPYRIGHT	i
AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xi
NOMENCLATURA.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objectivos.....	2
1.4 Estrutura da dissertação	3
2. ESTADO DA ARTE	5
2.1 Arco Eléctrico	5
2.2 Processo de soldadura com eléctrodos revestidos (SER).....	8
2.3 Processo de soldadura <i>Tungsten Inert Gas</i> (TIG).....	12
2.4 Emissão de fumos na soldadura por fusão	14
2.4.1 Nanopartículas	15
2.5 Redução de fumos de soldadura	19
2.6 Conclusão	19
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	21
3.1 Introdução	21
3.2 Equipamentos utilizados	22
3.2.1 Máquina de soldadura KemppiProMig 501	22

3.2.2	Monitor de área de superfície de nanopartículas	22
3.2.3	Amostrador de aerossóis nanométricos.....	24
3.2.4	Microscópio electrónico de transmissão	26
3.3	Materiais de base	27
3.4	Consumíveis.....	28
3.4.1	Processo SER	28
3.4.2	Processo TIG.....	29
3.5	Ensaaios experimentais com SER.....	29
3.5.1	Recolha de amostras para medição com monitor de área de superfície de nanopartículas	32
3.5.2	Recolha de amostras com o amostrador de aerossóis nanométricos para análise em TEM.....	33
3.6	Ensaaios experimentais com TIG	34
3.6.1	Recolha de amostras para medição com monitor de área de superfície de nanopartículas	36
3.6.2	Recolha de amostras com o amostrador de aerossóis nanométricos para análise em TEM.....	37
3.7	Conclusões.....	38
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	Introdução	39
4.2	Medições de nanopartículas no processo SER.....	39
4.2.1	Eléctrodo 7018 com 4 mm de espessura.....	39
4.2.2	Eléctrodo 7018-1 com 2,5 mm de espessura.....	40
4.2.3	Eléctrodo 7018-1 com 3,2 mm de espessura.....	41
4.2.4	Eléctrodo 7018-1 com 4 mm de espessura.....	42
4.2.5	Eléctrodo 6013 com 2,5 mm de espessura.....	43
4.2.6	Eléctrodo 6010 com 3,2 mm de espessura.....	44
4.3	Medições de nanopartículas no processo TIG	44
4.3.1	Vareta consumível ER 70S-3.....	45
4.3.2	Vareta consumível ER 304LSi	45

4.3.3	Sem material de adição em aço ao carbono	46
4.3.4	Sem material de adição em aço inoxidável	47
4.4	Resultados da análise por microscopia.....	48
4.4.1	Análise química das partículas recolhidas na soldadura SER.....	48
4.4.2	Análise morfológica das partículas recolhidas na soldadura SER.....	49
4.4.3	Análise química das partículas recolhidas no processo TIG	50
4.4.4	Análise morfológica das partículas recolhidas no processo TIG	52
5.	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHO FUTURO.....	55
	BIBLIOGRAFIA.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Características típicas do arco eléctrico para diferentes processos de soldadura[1].....	7
Figura 2.2 - Destacamento de gota metálica no processo SER[2]	8
Figura 2.3 - Soldadura com eléctrodos revestidos[1]	8
Figura 2.4 - Soldadura TIG	12
Figura 2.5 - Tocha para soldadura TIG	13
Figura 2.6 - Curvas de deposição nas regiões extratorácica, traqueobronquial e alveolar	16
Figura 3.1 - Máquina de soldadura KemppiProMig 501 e fonte de potência KemppiProEvolution 3200	22
Figura 3.2 - Diagrama de fluxo do NSAM 3550[12].....	24
Figura 3.3 - NSAM, monitor de área de superfície de nanopartículas[12]	24
Figura 3.4 - Amostrador de aerossóis nanométricos (NAS)[13]	25
Figura 3.5 - Diagrama de funcionamento do amostrador de aerossóis nanométricos (NAS)[13].....	26
Figura 3.6 - Microscópio electrónico de transmissão Hitachi H-8100 II[14]	26
Figura 3.7 - Esquema de montagem da estação de soldadura para recolha de partículas com o NSAM	33
Figura 3.8 - Esquema de montagem da estação de soldadura para recolha de partículas com o NAS	34

Figura 3.9 - Esquema de montagem da mesa de soldadura para recolha de nanopartículas com o processo TIG	37
Figura 3.10 - Esquema de montagem da mesa de soldadura para recolha de nanopartículas para análise em TEM com o NAS.....	38
Figura 4.1 - Análise às nanopartículas libertadas no processo SER com o eléctrodo E7018 com 4mm de espessura	40
Figura 4.2 - Análise às nanopartículas libertadas no processo SER com o eléctrodo E7018-1 com 2,5 mm de espessura	41
Figura 4.3 - Análise às nanopartículas libertadas no processo SER com o eléctrodo E7018-1 com 3,2 mm de espessura	42
Figura 4.4 - Análise às nanopartículas libertadas no processo SER com o eléctrodo E7018-1 com 4 mm de espessura	43
Figura 4.5 - Análise às nanopartículas libertadas no processo SER com o eléctrodo E6013 com 2,5 mm de espessura.....	44
Figura 4.6 - Análise às nanopartículas libertadas no processo TIG com o consumível ER 70S-3 em aço ao carbono.....	45
Figura 4.7 - Análise às nanopartículas libertadas no processo TIG com o consumível ER 304LSi em aço inoxidável	46
Figura 4.8 - Análise às nanopartículas libertadas no processo TIG sem material de adição em aço inoxidável.....	47
Figura 4.9 - Análise EDS para a amostra recolhida após soldadura com o processo SER e o eléctrodo E7018-1	49
Figura 4.10 - Imagens capturadas em TEM de nanopartículas libertadas com o processo de soldadura SER com o eléctrodo E7018-1, a) Partículas à escala de 500nm, b) Partículas à escala de 200 nm.....	50
Figura 4.11 - Análise EDS para a amostra recolhida após soldadura com o processo TIG e o consumível ER 70S-3	51
Figura 4.12 - Análise EDS para a amostra recolhida após soldadura com o processo TIG e o consumível ER 304Lsi	52
Figura 4.13 - Imagens capturadas em TEM de nanopartículas libertadas com o processo de soldadura TIG com o consumível ER 70S-3 em aço ao carbono, a) Escala de 100 nm, b) Escala de 200 nm, c) Escala de 500 nm	52
Figura 4.14 - Imagens capturadas em TEM de nanopartículas libertadas com o processo de soldadura TIG com o consumível ER 304LSi em aço inoxidável, a) Escala de 100 nm, b) Escala de 500 nm	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros de soldadura.....	11
Tabela 2.2 - Classificação dos revestimentos em SER.....	11
Tabela 2.3 Efeitos na saúde pelos elementos químicos presentes na soldadura[9].....	15
Tabela 2.4 - Fontes potenciais de emissão de nanopartículas[10].....	18
Tabela 3.1 - Composição química do aço ao carbono SA-283[15].....	27
Tabela 3.2 - Composição química do aço inoxidável SA-240[15].....	27
Tabela 3.3 - Composição química do material depositado na soldadura com eléctrodos revestidos básicos segundo a especificação SFA-5.1[17].....	28
Tabela 3.4 - Composição química do material depositado na soldadura com eléctrodos revestidos rútilicossegundo a especificação SFA-5.1[17]	28
Tabela 3.5 - Composição química do material depositado na soldadura de aço ao carbono com o consumível segundo a especificação SFA-5.18[17].....	29
Tabela 3.6 - Composição química do material depositado na soldadura de aço inoxidável com o consumível segundo a especificação SFA-5.9[17].....	29
Tabela 3.7 - Planeamento de ensaios para o eléctrodo 7018 no processo SER	30
Tabela 3.8 - Planeamento de ensaios para o eléctrodo 7018-1 no processo SER.....	30
Tabela 3.9 - Planeamento de ensaios para o eléctrodo 6013 no processo SER	31
Tabela 3.10 - Planeamento de ensaios para o eléctrodo 6010 no processo SER	32
Tabela 3.11 - Planeamento de ensaios para o processo TIG com aço ao carbono.....	35
Tabela 3.12 - Planeamento de ensaios para o processo TIG com aço inoxidável.....	36

NOMENCLATURA

AC	<i>Alternate Current</i> (Corrente alterna)
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
E	<i>Electrode</i> (Eléctrodo)
EDS	<i>Energy dispersive X-ray spectroscopy</i> (Espectrometria de dispersão de energia)
ER	<i>Electrode Rod</i> (Vareta)
ICRP	<i>International Commission of Radiological Protection</i> (Comissão Internacional de Protecção Radiológica)
IST	Instituto Superior Técnico
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i> (Metal gás inerte)
N.D.	Não disponível
NSAM	<i>Nanoparticle Surface Area Monitor</i> (Monitor de área de superfície de nanopartículas)
NAS	<i>Nanometer Aerosol Sampler</i> (Amostrador de aerossóis nanométricos)
SAS	Soldadura por Arco Submerso
SER	Soldadura por Eléctrodos Revestidos
TEM	<i>Transmission Electron Microscope</i> (Microscópio electrónico de transmissão)
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i> (Tungsténio gás inerte)
TSI	<i>Trust Science Innovation, Inc</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Os processos de soldadura por arco eléctrico são, sem dúvida, os processos mais importantes na soldadura por fusão. Há, pelo menos, 35 processos de soldadura com diferentes variantes e, na maioria dos casos, utiliza-se energia térmica para fundir o metal, de forma a criar a ligação entre as partes a serem soldadas, as quais solidificam ao retirar-se a fonte de calor [1].

O processo de soldadura por eléctrodos revestidos utiliza o calor do arco eléctrico, produzido entre o eléctrodo revestido e o material a soldar, para fundir o material de base e o eléctrodo, formando-se assim o material de adição, o qual é depositado, no estado líquido, na junta a soldar. Os dois materiais fundidos pelo calor do arco (material de base e material de adição) formam, assim, o banho de fusão, cuja composição química é a mistura das composições químicas dos materiais fundidos que lhe deram origem. A protecção gasosa necessária à soldadura é fornecida pela decomposição do revestimento do eléctrodo [1].

O processo TIG (*Tungsten Inert Gas*) é um processo de soldadura por arco eléctrico no qual este é estabelecido através de um eléctrodo não consumível de tungsténio e a peça, no seio de uma atmosfera de protecção de gás inerte. A

principal função do arco eléctrico, neste processo de soldadura, é o fornecimento de calor para criar o banho de fusão e fundir o material de adição, que é adicionado separadamente através de uma vareta [1].

A soldadura é o principal processo industrial para ligação entre metais, no entanto, produz fumos que podem ser perigosos para a saúde do soldador, e estima-se que, presentemente, 1 a 2% dos profissionais são expostos a estes fumos. Estes fumos contém partículas [3] que podem ser encontrados desde a escala nanométrica até à escala da centena do micron. Estas partículas têm uma grande probabilidade de se virem a depositar nas regiões alveolares dos pulmões [4]. Os metais pesados presentes nos fumos de soldadura – principalmente crómio, manganês, níquel e ferro – podem causar problemas respiratórios, como a febre metálica, asma brônquica, obstrução pulmonar crónica, e cancro do pulmão[5]tendo-se que a sua emissão é influenciada directamente pelos parâmetros e condições de soldadura [6].

1.2 Motivação

Os estudos realizados [3] visam determinar a relação entre a área superficial de deposição das nanopartículas nos alvéolos pulmonares e a natureza do revestimento de eléctrodos revestidos, assim como dos parâmetros eléctricos no processo MAG, onde se efectuaram medições a distâncias diferentes da frente de soldadura. Não foram, ainda, realizados estudos para o processo TIG, nem para determinando tipos de eléctrodos revestidos, assim como não foi, ainda, determinada uma relação entre parâmetros eléctricos de soldadura e a área de deposição superficial de nanopartículas emitidas, ou a sua concentração, nos processos SER e TIG.

1.3 Objectivos

Este trabalho teve como objectivos:

- Simular um ambiente industrial de soldadura, utilizando os equipamentos e consumíveis necessários à criação de condições operacionais para efectuar o estudo.
- Recolher partículas libertadas durante a execução de soldadura segundo os dois processos, para serem posteriormente analisadas.

- Caracterizar as partículas em função da sua concentração e composição.
- Correlacionar estas características com os parâmetros de soldadura em causa.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação tem a seguinte estrutura:

1. Introdução: Descrição do enquadramento, motivação, objectivos e estrutura da dissertação.
2. Estado da arte: Caracterização dos processos de soldadura utilizados (SER e TIG), arco eléctrico, emissões de nanopartículas e os dispositivos de recolha destas.
3. Procedimento experimental: Descrição dos parâmetros e condições de soldadura adoptadas, metodologia de recolha de fumos e análises efectuadas.
4. Resultados e discussão: Análise e crítica dos resultados obtidos
5. Conclusões e perspectivas de trabalho futuro: Exposição das conclusões tiradas do estudo realizado e sugestões para prosseguir os estudos.
6. Bibliografia.

2. ESTADO DA ARTE

Este trabalho teve como assunto principal, a soldadura por fusão com arco eléctrico, englobando dois dos processos mais utilizados na indústria: Soldadura com Eléctrodos Revestidos (SER), e *Tungsten Inert Gas* (TIG).

2.1 Arco Eléctrico

Um arco eléctrico pode ser definido como um condutor gasoso no qual se transforma energia eléctrica em energia calorífica. O arco eléctrico é estabelecido através de uma descarga eléctrica entre dois eléctrodos, a qual é mantida devido ao desenvolvimento de um meio gasoso condutor. Os eléctrodos, através dos quais se estabelece o circuito eléctrico, em soldadura, são metálicos. O eléctrodo negativo, a partir do qual são emitidos os electrões denomina-se cátodo, enquanto que o eléctrodo positivo é conhecido como ânodo. O movimento dos electrões do cátodo para o ânodo é o resultado da diferença de potencial entre os dois eléctrodos [1].

Existem três zonas distintas no arco eléctrico:

- Zona de queda de tensão catódica, junto ao cátodo;

- Zona de queda de tensão anódica, junto ao ânodo;
- Coluna de arco ou plasma de arco, zona central do arco.

A coluna de arco, zona central do arco eléctrico, é composta por electrões, iões positivos e partículas neutras (átomos e moléculas no estado excitado e não-excitado) e é caracterizada por dois aspectos principais:

- Elevada temperatura (de forma a que o gás esteja suficiente ionizado para que se torne condutor);
- Fluxo de elevada velocidade (do eléctrodo para a peça)

A temperatura é mantida desde que haja uma geração de energia suficiente para que se compensem as perdas por condução, convecção e radiação. Nesta zona os electrões dirigem-se para o ânodo e os iões positivos para o cátodo. A corrente é transportada através de um plasma constituído por gás ionizado (composto por electrões e iões) [1].

A ligação eléctrica entre o cátodo e a coluna de arco é uma região onde ocorre uma significativa queda de potencial (4,5 a 5,3 V). Esta zona tem importância em soldadura, porque é nela que os electrões que fluem através do plasma de arco são produzidos, e a facilidade e estabilidade desta geração de electrões determina a estabilidade do arco eléctrico [1].

Na zona próxima do ânodo a temperatura desce do elevado valor que caracteriza a coluna de arco para um valor mais baixo, que caracteriza o ânodo. Devido a este facto há uma desestabilização da continuidade do fluxo de iões, a concentração de iões positivos decresce dando origem a uma zona de carga negativa a qual é responsável pela queda de tensão [1].

Os efeitos dos campos magnéticos externos no arco eléctrico são determinados pela força de Lorentz, a qual é proporcional ao vector do produto da força de campo exterior pela corrente. Estes campos magnéticos são responsáveis pela ocasional deflexão do arco [1].

Existe uma relação característica de cada processo entre a potência do arco eléctrico e a corrente de arco, como se ilustra na Figura 2.1.

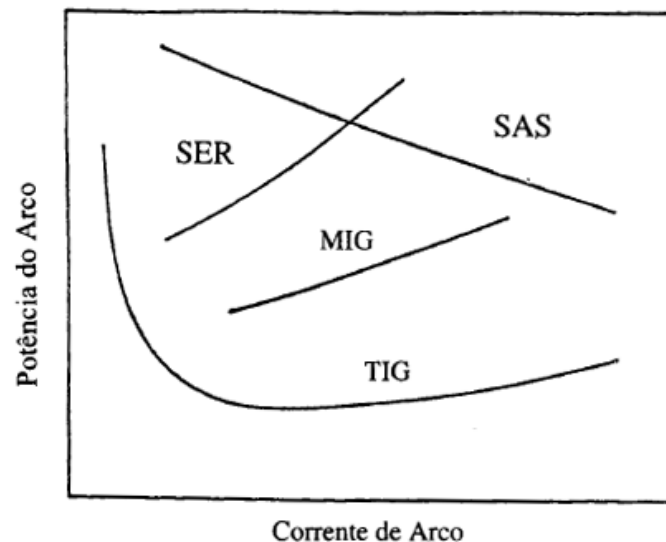


Figura 2.1 - Características típicas do arco eléctrico para diferentes processos de soldadura[1]

O decréscimo inicial da tensão do arco em soldadura TIG, pode ser atribuído a um aumento da ionização térmica e à emissão induzida termicamente no cátodo. A seguir a esta região a voltagem aumenta com a corrente de uma forma linear que depende do tipo de arco [1].

O potencial total do arco cresce geralmente à medida que o espaço entre os eléctrodos aumenta. Devido ao facto da coluna de arco perder constantemente carga devido à migração radial para a fronteira fria do arco, o aumento do comprimento do arco expõe mais a zona da coluna de arco à fronteira fria, a qual aumenta também de tamanho, tornando necessária a aplicação de uma tensão suplementar para manter o escoamento (fluxo) de carga [1].

A transferência do metal do eléctrodo para a peça é efectuada por via do destacamento de uma gota metálica, que é um fenómeno dependente de um balanço das forças estáticas que actuam no processo de transferência, como se ilustrada na Figura 2.2:

- Força da gravidade (F_g)
- Força de arrastamento do plasma (F_s)
- Força electromagnética (F_{em})
- Tensão superficial (F_γ)
- Força de vaporização (F_v)
- Força explosiva

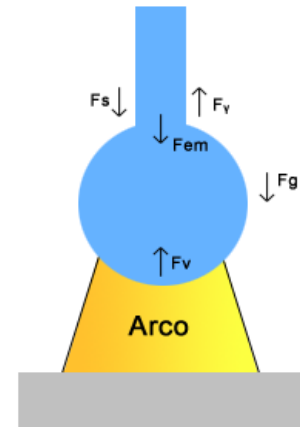


Figura 2.2 - Destacamento de gota metálica no processo SER [2]

Sendo as quatro primeiras determinantes sobre o modo de transferência. Uma gota destaca-se então quando:

$$F_g + F_s + F_{em} = F_\gamma \quad (2.1.1)$$

2.2 Processo de soldadura com eléctrodos revestidos (SER)

O processo de soldadura com eléctrodos revestidos utiliza o calor do arco eléctrico, produzido entre o eléctrodo revestido e o material a soldar, para fundir o material de base e o eléctrodo, formando assim o material de adição, o qual é depositado no estado de fusão, na junta a soldar. A Figura 2.3 ilustra este processo [1].

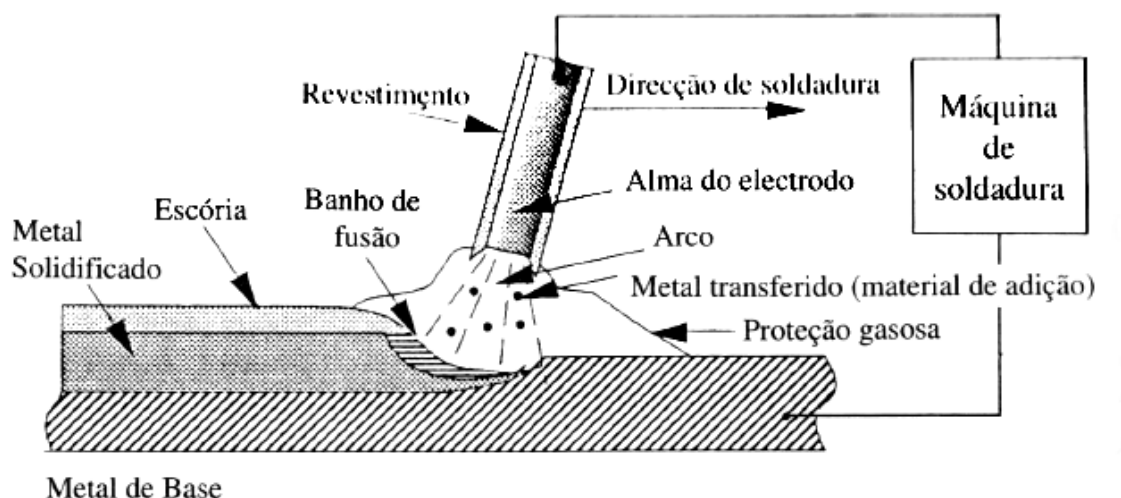


Figura 2.3 - Soldadura com eléctrodos revestidos[1]

O material fundido do eléctrodo é transferido através do arco eléctrico em pequenas gotas de metal, as quais são constituídas pelo mesmo material do revestimento do eléctrodo [1].

O arco eléctrico é deslocado manualmente ao longo da junta a soldar, com uma determinada velocidade, sendo mantido com o comprimento mais adequado, de modo a que o arco seja o mais estável possível, e portanto as projecções de metal e fumos libertados sejam reduzidos ao mínimo. O processo necessita de uma fonte de potência capaz de fornecer uma corrente eléctrica suficientemente elevada para fundir o(s) eléctrodo(s) que se pretendem utilizar. A intensidade de corrente a fornecer depende do diâmetro dos eléctrodos, tipo de revestimento e composição química do metal constituinte do seu interior (“alma” do eléctrodo) [1].

Um eléctrodo revestido é responsável pelas características mecânicas e físicas do cordão de soldadura. O eléctrodo é formado por uma vareta que constitui a alma metálica, revestida por uma camada de materiais minerais ou orgânicos denominada revestimento [1].

O revestimento dos eléctrodos é o componente essencial da sua constituição. É constituído por corpos pulverulentos, os quais, reagindo à temperatura do arco, dão origem a uma escória fusível e à libertação de gases. Estes componentes são ligados por um aglomerante, e são formados à base de silicatos de sódio ou de potássio. O revestimento dos eléctrodos tem funções que se podem dividir em tres categorias: eléctrica, física e metalúrgica [1].

Função eléctrica

O revestimento é um mau condutor, servindo de isolante para a vareta, evitando escorvamentos laterais de arcos eléctricos (arcos eléctricos parasitas), no entanto, às temperaturas do arco eléctrico estes tornam-se condutores. O arco eléctrico entre a peça e o eléctrodo é escorvado por simples contacto entre os dois, sendo a ionização da atmosfera circundante facilitada através da introdução de elementos com baixo potencial de ionização no revestimento, como é o caso do sódio e o potássio, sendo que estes também permitem melhorar a estabilidade do arco [1].

Função física

O revestimento do eléctrodo funde formando a escória. Esta escória recobre, não só o banho de fusão, mas também as gotas de metal transferidas através do arco eléctrico, protegendo-os da acção contaminadora dos gases atmosféricos. A escória em fusão modifica por seu lado o comportamento físico do banho de fusão, actuando nas suas características através da sua densidade, viscosidade e tensão superficial, fazendo com que estes sejam substancialmente diferentes das do metal fundido. Desta forma, é possível realizar soldaduras noutras posições que não ao baixo (posição onde o material é depositado a favor da acção da força de gravidade) [1].

Função Metalúrgica

Os gases formados a partir do revestimento libertam oxigénio, no entanto, os agentes redutores (por exemplo, silício) neste presente permitem eliminá-lo sob a forma de óxidos, os quais contribuem, por seu lado, para a formação de escória [1].

Se o plasma de arco contem hidrogénio, uma pequena quantidade deste gás entra em solução com o banho de fusão, o que, por vezes, pode dar origem a um problema conhecido por fissuração a frio. Existem, contudo, certos tipos de revestimentos que não contêm qualquer substância hidrogenada, e são praticamente isentos de água, desde que seja providenciado um tratamento de secagem adequado [1].

Uma das funções metalúrgicas mais importantes do revestimento é a sua capacidade de adição, no banho de fusão, de elementos destinados a formar o metal desejado ou a substituir os elementos oxidados no arco eléctrico. Trata-se, assim, de obter através do revestimento, um depósito com uma composição química bem definida, partindo de uma alma metálica cuja composição é conhecida [1].

Desta forma, é possível adicionar ao banho de fusão elementos destinados a “fabricar” aços com uma determinada composição química, partindo de almas cuja composição é semelhante à de um vulgar aço ao carbono [1].

Na Tabela 2.1 indicam-se os principais parâmetros de soldadura do processo.

Tabela 2.1 - Parâmetros de soldadura

Principais parâmetros operatórios no processo SER

- Diâmetro e tipo de eléctrodo
 - Intensidade da corrente de soldadura
 - Tensão (controlada pela altura do arco)
 - Velocidade de avanço de soldadura
-

Existem vários tipos de revestimentos e na Tabela 2.2 indicam-se as classificações dos principais eléctrodos utilizados na indústria:

Tabela 2.2 - Classificação dos revestimentos em SER

Classificação dos revestimentos em SER [1]

- Rutílico

Trata-se de um revestimento que contém quantidades significativas de óxido de titânio (Rutilo – TiO_2), que produz uma escória abundante, densa e de fácil remoção. São eléctrodos de fácil utilização, tanto em corrente contínua como alternada, excepto quando contêm uma percentagem elevada de pó de ferro. Produzem um cordão de soldadura de bom aspecto, enquanto a penetração é reportada como sendo média, e o metal depositado tem uma fraca resistência à fissuração a quente. São eléctrodos de grande versatilidade e uso geral.

- Básico

É um revestimento que contém quantidades importantes de carbonatos de cálcio ou outros, bem como, de fluorite, sendo capaz de gerar uma escória de características básicas que, juntamente com o anidrido carbónico originado pela decomposição do carbonato, protege a soldadura do contacto com a atmosfera. Trata-se de um revestimento que não possui matérias orgânicas na sua constituição, e se for correctamente utilizado origina soldaduras de baixo teor de hidrogénio, minimizando a possibilidade de ocorrência de fissuração a frio. A penetração é média e o cordão de soldadura possui boas propriedades mecânicas.

- Celulósico

Este revestimento possui uma elevada quantidade de materiais orgânicos, como a celulosa, os quais decompondo-se no arco eléctrico geram grandes quantidades de gases que protegem o metal líquido da contaminação atmosférica. A quantidade de escória produzida é pequena, e o arco eléctrico origina grandes quantidades de salpicos e fumos. A penetração é elevada quando comparada com os outros

revestimentos. O aspecto do cordão não é bom, apresentando escórias irregulares. As propriedades mecânicas são contudo consideradas boas, embora exista uma probabilidade relativamente elevada de ocorrência de fragilização pelo hidrogénio. São utilizados na soldadura em posição e execução de passes de raiz. A sua maior utilização é na soldadura de tubagem [1].

2.3 Processo de soldadura *Tungsten Inert Gas* (TIG)

O TIG é um processo de soldadura por arco eléctrico no qual este é estabelecido através de um eléctrodo não consumível de tungsténio e a peça, no seio de uma atmosfera de protecção de gás inerte (árgon ou hélio) [1].

Em soldadura TIG a função principal do arco eléctrico é o fornecimento de calor para criar o banho de fusão e fundir o conjunto material de base e material de adição, e este último, se necessário, é adicionado, separadamente, através de uma vareta como se representa na Figura 2.4 [1].

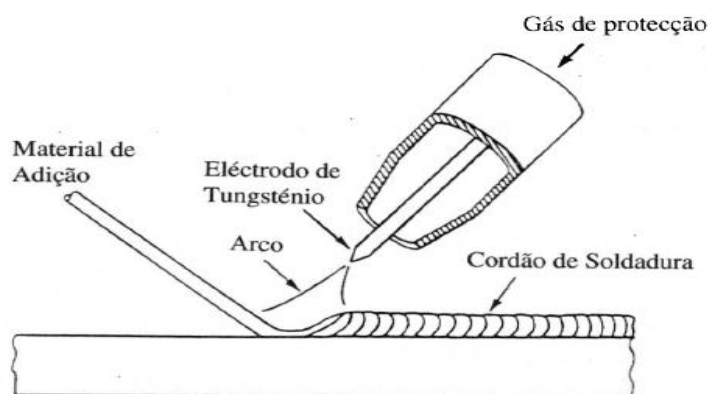


Figura 2.4 - Soldadura TIG

Esta adição é realizada através da alimentação de fio nu, manual ou mecanicamente.

Uma segunda função do arco é promover a limpeza da superfície do banho de fusão e do metal de base adjacente, de óxidos superficiais, não sendo, portanto, necessária a utilização de fluxo. O gás de protecção deve ser inerte para que não haja contaminação do eléctrodo de tungsténio [1].

A escolha do tungsténio, como eléctrodo, é devida ao seu elevado ponto de fusão e à sua elevada emissividade. A primeira característica permite a redução do desgaste do eléctrodo, enquanto que a segunda facilita a ionização e, por consequência, o estabelecimento do arco e a sua manutenção [1].

É possível a utilização de polaridade directa ou inversa em corrente contínua, e corrente alternada, sendo que o arco se comporta diferentemente conforme o eléctrodo de tungsténio se encontra ligado ao pólo positivo ou ao pólo negativo [1].

Existem ligas leves que, com processos convencionais não se soldam (como é o caso do magnésio e do alumínio) devido à fina película de óxido refractário que formam na sua superfície. Nestes casos é possível soldar com o TIG, em corrente alterna ou corrente contínua em polaridade inversa, devido à emissão de electrões do cátodo (que se encontra ligado à peça), ou do ciclo negativo da soldadura em AC. Este fluxo de electrões é o suficiente para quebrar esta película de óxido [1].

O escorvamento pode ser efectuado de duas formas: por contacto, ao encostar-se o eléctrodo de tungsténio à peça, afastando-o imediatamente a seguir, o que provoca um curto-circuito, e inicia o arco, mas também dá origem à contaminação da ponta do eléctrodo; ou em máquinas que tenham uma unidade de alta frequência, apenas pela aproximação do eléctrodo à peça [1].

A Figura 2.5 ilustra uma tocha de soldadura manual típica para o processo TIG:

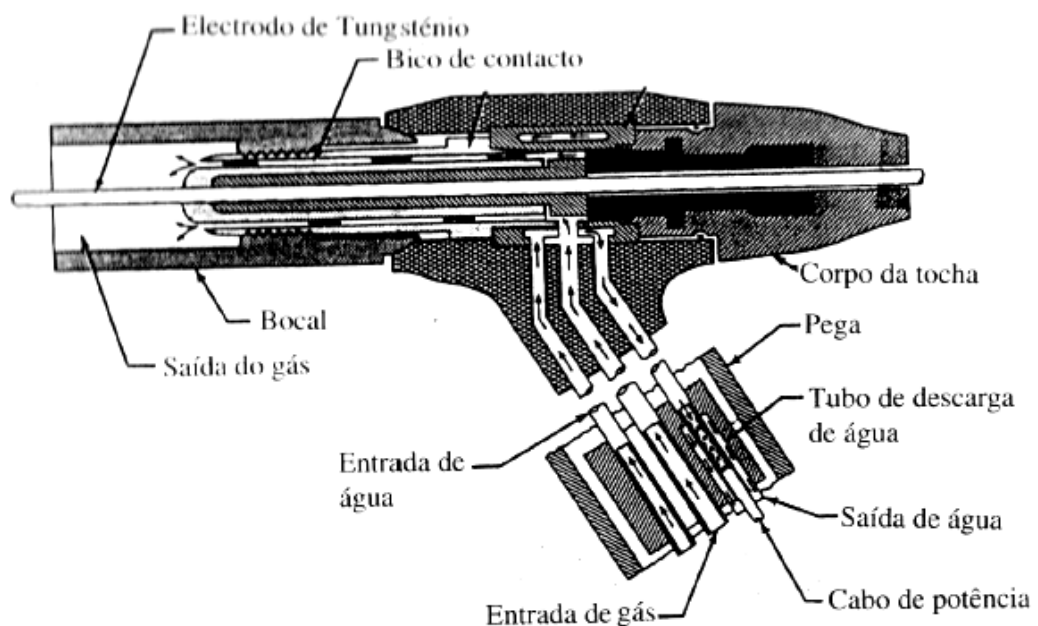


Figura 2.5 - Tocha para soldadura TIG

Os débitos de gás normalmente utilizados em soldadura TIG são, geralmente, de 4 a 15 l/min. O argon e o hélio são fornecidos em garrafas sob pressão de 15 MPa.

A soldadura TIG utiliza-se com frequência para soldar chapas finas e realizar passes de raiz. Nestes casos, é essencial evitar a contaminação atmosférica da parte posterior do cordão [1].

2.4 Emissão de fumos na soldadura por fusão

A soldadura produz fumos que são nocivos para a saúde do soldador. Em espaços confinados, a soldadura pode ser mortífera, dado que sem a ventilação adequada, os fumos tóxicos e gases se acumulam em concentrações demasiado nocivas [7].

Os fumos de soldadura consistem em partículas de óxidos metálicos e gases que se formam durante a soldadura. As partículas são suficientemente pequenas para que se mantenham em suspensão e sejam inaladas facilmente. O aço contém elementos de liga que podem ser nocivos para a saúde do trabalhador, como, por exemplo, o manganês, que é um elemento reconhecido como sendo potencialmente responsável pela doença de Parkinson [7].

A recente legislação ambiental, tanto em termos de saúde como de segurança, na UE e nos EUA estão a originar à necessidade do estudo detalhado dos mecanismos de soldadura e a selecção de procedimentos operacionais que reduzam a emissão de fumos [7].

A revisão dos limites de exposição resultou na redução destes valores relativamente à libertação de substâncias tóxicas durante a soldadura, e esta tendência deverá continuar nos próximos anos, de modo a reduzir a incidência de doenças relacionadas com o trabalho, nos soldadores [7].

A composição química das partículas e a quantidade de fumos produzidos durante a soldadura depende do procedimento de soldadura, dos consumíveis de soldadura, dos materiais de base, da presença de revestimentos, assim como do tempo e a severidade da exposição [7].

2.4.1 Nanopartículas

A influência das nanopartículas na saúde tem vindo a levantar preocupações, dado que estas resultam de inúmeros processos industriais, entre os quais a soldadura [8].

Na Tabela 2.3 indicam-se alguns dos efeitos que os elementos químicos intervenientes na soldadura têm na saúde.

Tabela 2.3 Efeitos na saúde pelos elementos químicos presentes na soldadura [9]

Elementos	Fonte	Efeitos na saúde
Crómio	Aço Inox, revestimento cromado.	Reacções alérgicas, irritações, hemorragias nasais, úlceras, problemas respiratórios, cancro do pulmão.
Níquel	Ligas de níquel, aço inox, baterias, moedas.	Cancro do pulmão, nariz, laringe e próstata, embolia pulmonar, falhas respiratórias, asma e bronquite crónica.
Manganês	Aço ao carbono, fertilizantes, cerâmicos, ligas de alumínio	Intolerância à glucose, coagulação de sangue, problemas de pele, sintomas neurológicos.
Ferro	Aço ao carbono, inox, etc.	Conjuntivite, retinite, siderose, aumento da probabilidade de ocorrência de cancro do pulmão para trabalhadores expostos a carcinogénios pulmonares.
Tungsténio	Eléctrodos de tungsténio na soldadura, filamentos de lâmpadas, Ecrãs LCD.	Irritante para a pele e olhos com o contacto. Irritação aos pulmões e membranas mucosas.

A deposição nos pulmões é a forma mais eficaz das partículas suspensas no ar entrarem no corpo humano e produzir efeitos adversos na saúde. As propriedades das nanopartículas mais importantes, para este efeito, são: a solubilidade, a morfologia da partícula, tamanho, composição e área superficial, sendo esta última muito importante na análise da toxicidade das nanopartículas, uma vez que é esta a característica que melhor parece correlacionar-se com os efeitos adversos na saúde [8].

Os métodos de medição de massa não são suficientemente sensíveis para determinadas partículas suspensas no ar e não são, igualmente, sensíveis para caracterizar as nanopartículas em termos dos efeitos relevantes para a saúde. A área de superfície é a métrica relevante para as nanopartículas, dado que a maior parte dos processos nos humanos ocorrem pela via respiratória, o que faz com que os efeitos adversos na saúde estejam dependentes das regiões de deposição no interior do corpo humano [8]. Na Figura 2.6, apresenta-se a relação entre o diâmetro das partículas e a zona do organismo humano onde se podem vir a depositar.

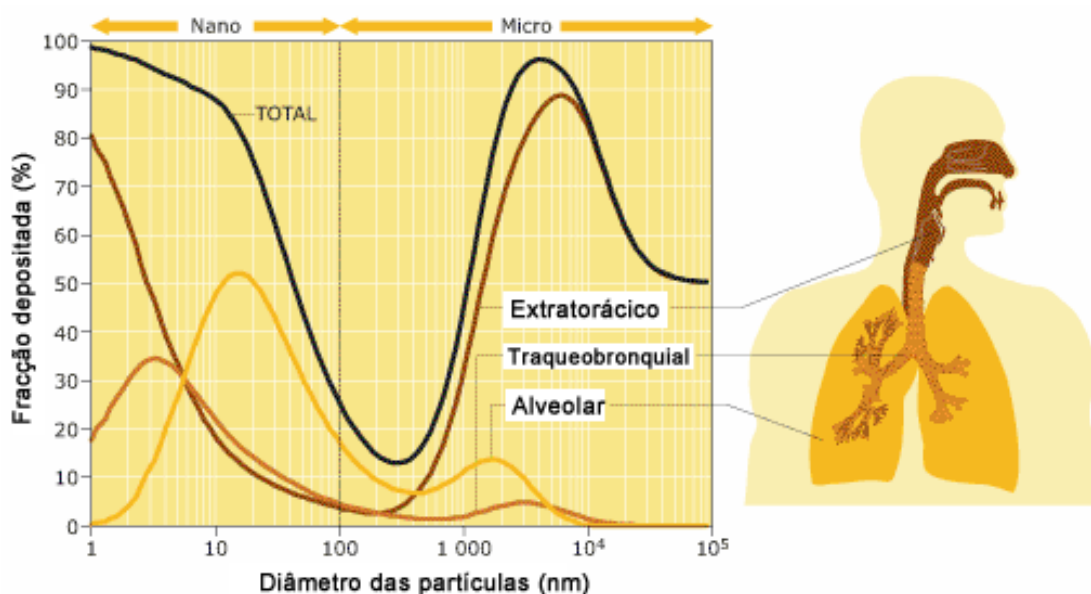


Figura 2.6 - Curvas de deposição nas regiões extratorácica, traqueobronquial e alveolar

Em 1996 a *International Commission of Radiological Protection* (ICRP) desenvolveu um modelo de deposição pulmonar para aerossóis radioactivos. São vários os parâmetros necessários na construção desse modelo, incluindo o ritmo de respiração, volume pulmonar, actividade, e respiração pelo nariz ou boca. As curvas de deposição derivadas do modelo variam de acordo com estes parâmetros. Para

aplicações de higiene industrial, foi desenvolvida uma definição de um trabalhador referência apresentada seguidamente [8]:

1) Parâmetros fisiológicos

Tipo de trabalhador: homem adulto

Capacidade funcional residual: 2200cm^3

Espaço morto extra-torácico: 50cm^3

Espaço morto bronquial: 49cm^3

Altura: 175cm

Diâmetro da traqueia: 1,65cm

Diâmetro do primeiro brônquio: 0,165cm

2) Parâmetros relacionados com a actividade

Nível de actividade: exercício leve

Tipo de actividade: respiração apenas pelo nariz

Taxa de ventilação: $1,3\text{m}^3/\text{h}$

Frequência de respiração: 15 inalações por minuto

Volume de inalação: 1450cm^3

Fracção inalada através do nariz: 1,0

3) Parâmetros do aerossol

Diâmetro médio aerodinâmico: $0,001\mu\text{m} - 0,5\mu\text{m}$

Desvio padrão geométrico: 1,0

Densidade: $1,0\text{g}/\text{cm}^3$

Factor de forma: 1,0

Em relação à exposição a nanopartículas, esta pode ocorrer segundo vários cenários como se indica na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Fontes potenciais de emissão de nanopartículas [10]

Tipo de processos	Exemplos de fontes de emissão
Térmicos	Fundição de metais; Metalização e galvanização; Soldadura de metais; Corte de metais; Tratamento térmico de superfícies; Aplicação de resinas e ceras.
Mecânicos	Maquinação; Lixagem; Perfuração; Polimento
Combustão	Emissões de motores diesel ou a gás; Centrais de incineração, térmicas e crematórios; Fumeiros; Aquecimento a gás

A natureza das nanopartículas, os métodos, as quantidades utilizadas, a duração, a frequência das tarefas, a capacidade dos produtos permanecerem no ar ou nas superfícies de trabalho e os meios de protecção existentes, constituem os principais parâmetros que influenciam o grau de exposição [10].

Os riscos de exposição a nanomateriais estão ligados às três vias de exposição potencial: inalação, ingestão e contacto dérmico. O aparelho respiratório constitui a via principal de penetração de nano-objectos no organismo humano, sendo essa via a mais importante nos indivíduos que praticam uma actividade física ou que apresentam a função pulmonar alterada ou deficiente. Os nano-objectos uma vez inalados, podem

ser libertados ou depositados em diferentes regiões do sistema respiratório. Essa deposição não é uniforme ao longo do sistema respiratório, pois varia em função do diâmetro, grau de agregação e aglomeração e do comportamento no ar dos nano-objectos, como se refere na Figura 2.6 - Curvas de deposição nas regiões extratorácica, traqueobronquial e alveolar [10].

2.5 Redução de fumos de soldadura

A redução de fumos de soldadura é necessária para melhorar as condições no local de trabalho para os soldadores. Este problema pode ser resolvido de 2 formas:

- **Redução na fonte:** SER e TIG são dois dos processos de soldadura mais utilizados. Como tal, a redução dos fumos na fonte deve ser efectuada nestes processos. Uma forma de reduzir a emissão de fumos é a diminuição da temperatura do arco, consequentemente, reduzindo a temperatura das gotas de material de adição provenientes do eléctrodo (SER) ou de uma vareta (TIG).
- **Ventilação e exaustão de fumos:** Existem várias opções para controlar o ar na oficina, mas nem todas são eficazes. A maior parte dos sistemas são rígidos, fazendo com que o soldador e o equipamento de soldadura sejam flexíveis nas posições e movimentos. Para analisar cada situação, é necessário desenvolver técnicas de simulação de fluxo de fumos na oficina. Estas simulações podem reduzir largamente o tempo necessário para verificar se o local de trabalho se encontra ventilado de forma apropriada[11].

Existem actualmente equipamentos de protecção de fumos nas máscaras de soldadura, no entanto, ainda não possuem a capacidade de filtrar nanopartículas.

2.6 Conclusão

Devido a esta ser uma área ainda pouco desenvolvida e com grandes implicações na saúde de um soldador, há uma grande necessidade de prosseguir com estudos no sentido de vir a estabelecer uma relação entre os vários parâmetros de soldadura com as emissões de nanopartículas, de modo a que se possa actuar para minimizar esta exposição o mais possível.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Neste estudo foram utilizados dois processos de soldadura: TIG e SER. Neste capítulo é descrita toda a experimentação realizada, como se indica em seguida:

- Descrição dos processos, metodologias, materiais e equipamentos utilizados;
- Realização dos ensaios de soldadura, incluindo a sua descrição, por forma a efectuar-se a recolha das partículas;
- Recolha e caracterização das partículas, provenientes da soldadura, com diferentes parâmetros operacionais.

3.2 Equipamentos utilizados

3.2.1 Máquina de soldadura KemppiProMig 501

O equipamento utilizado para as soldaduras foi uma máquina de soldar Kemppi ProMig 501, em conjunto com uma fonte de alimentação ProEvolution 3200.

É uma máquina que tem a possibilidade de trabalhar em corrente ou tensão constante, pelo que é possível usar os processos de soldadura SER e MIG/MAG, respectivamente. O processo de soldadura TIG tal como o SER, é de corrente constante, e embora esta máquina não esteja preparada para o utilizar (não tendo nenhuma porta de fornecimento de gás apropriada), é possível efectuar soldaduras com este processo com o auxílio de uma tocha mecânica, isto é, em que a alimentação de gás é feita manualmente por via de uma válvula, e é injectada directamente na tocha.



Figura 3.1 - Máquina de soldadura Kemppi ProMig 501 e fonte de potência Kemppi ProEvolution 3200

O controlador digital desta máquina tem uma opção *WELDDATA* que indica os parâmetros utilizados após um ensaio completo de soldadura, fazendo a média dos valores instantâneos à medida que se vai avançando na deposição do cordão, tornando a aquisição de dados muito precisa.

3.2.2 Monitor de área de superfície de nanopartículas

O equipamento utilizado para este fim foi um *Nanoparticle Surface Area Monitor 3550 (NSAM)* fabricado pela TSI Inc., que faz a medição da área de superfície das partículas depositada no pulmão humano (em $\mu\text{m}^2/\text{cm}^2$) nas zonas traqueobronquial e

alveolar deste. O NSAM 3550 fornece uma solução simples e rápida para a medição de partículas depositadas nos pulmões. É um instrumento importante para investigação nas áreas de toxicologia, efeitos de saúde e epidemiologia [12].

Utiliza um software para recolha, armazenamento e cálculo da área total depositada, durante um período médio de trabalho (8 horas), com uma resolução de 10 nm [12].

O funcionamento do NSAM 3550 é baseado na difusão de cargas electrostáticas das amostras de partículas, seguindo-se a sua detecção num electrómetro. A amostra é capturada continuamente para o aparelho a uma taxa de 2,5L/min, após a passagem por um ciclone que retém as partículas superiores a 1µm. O fluxo é separado com 1 L/min e feito passar por um filtro de carbono e um ionizador, sendo que os restantes 1,5L/min são medidos como fluxo de aerossol [12].

Os fluxos são, seguidamente, misturados numa câmara com as partículas do fluxo de aerossol, em conjunto com os iões presentes no ar limpo filtrado. Seguidamente, são removidos os iões em excesso desta mistura, que segue para um electrómetro de aerossóis para medição da sua carga eléctrica. Neste electrómetro, a corrente passa das partículas para um filtro condutor, e são medidas por um amplificador. Os fluxos, no instrumento, são controlados por um microprocessador que mede os vários parâmetros operacionais [12].

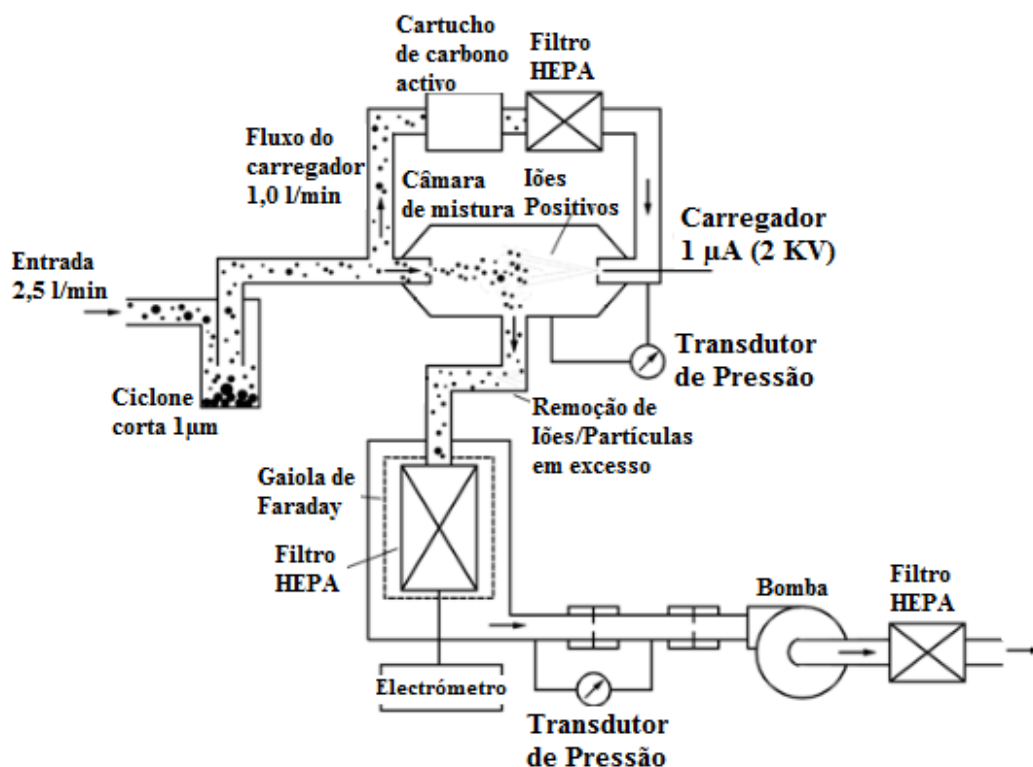


Figura 3.2 - Diagrama de fluxo do NSAM 3550 [12]

Para avaliação da exposição a nanopartículas, utiliza-se o modo de deposição de partículas na região alveolar do pulmão de um trabalhador. A análise dos dados é feita num *software* específico da TSI.



Figura 3.3 - NSAM, monitor de área de superfície de nanopartículas [12]

3.2.3 Amostrador de aerossóis nanométricos

O modelo 3089 *Nanometer Aerosol Sampler* (NAS) permite monitorizar o local de deposição utilizando dois tamanhos de eléctrodo de modo a obter um tamanho de deposição óptimo para o sistema de análise. O equipamento contém uma fonte de

alimentação de alta tensão negativa, uma bomba e um mostrador LCD, com a possibilidade de controlar esta tensão e o fluxo de ar [13].



Figura 3.4 - Amostrador de aerossóis nanométricos (NAS) [13]

O equipamento utiliza o método da precipitação electrostática, para amostrar aerossóis em substratos, que podem ser posteriormente analisados por microscopia electrónica. As partículas capturadas poderão ter entre 2 a 100 nm de diâmetro [13].

O substrato é colocado no eléctrodo amostra utilizando fita adesiva de carbono. O eléctrodo é instalado dentro do amostrador e colocado a uma tensão fixa. O campo eléctrico vai concentrar partículas carregadas da entrada de ar para uma porção do substrato, e, posteriormente, este pode ser removido para análise [13].

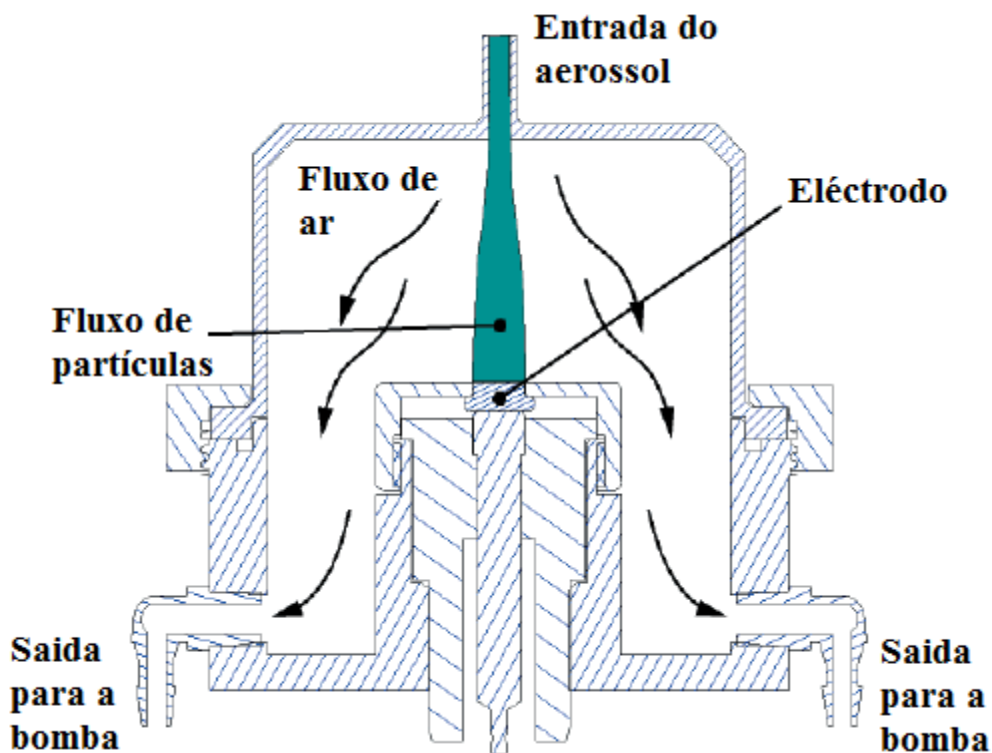


Figura 3.5 - Diagrama de funcionamento do amostrador de aerossóis nanométricos (NAS) [13]

3.2.4 Microscópio electrónico de transmissão

Para análise das nanopartículas obtidas no substrato utilizado com o amostrador de aerossóis nanométricos, foi utilizado um microscópio electrónico de transmissão (TEM), de marca Hitachi, modelo H-8100 II, de 200kV e com canhão de electrões por emissão térmica através de um filamento de LaB_6 , com porta-amostras *double-tilt* que inclina a amostra em 2 direcções perpendiculares (90° e 60°), equipado com um sistema de microanálise por espectrometria de dispersão de energia de raios-X (EDS), com detector de elementos leves da marca ThermoNoran, modelo NoranSystemSix, e com aquisição digital de imagem através de uma câmara CCD MegaView II *bottom-mounted* [14].

Figura 3.6 - Microscópio electrónico de transmissão Hitachi H-8100 II [14]

3.3 Materiais de base

Como materiais de base foram utilizados: um aço ao carbono comum de especificação SA-283 e um aço inoxidável austenítico de especificação SA-240. Na Tabela 3.1 indica-se a composição química do aço SA-283 [15].

Tabela 3.1 - Composição química do aço ao carbono SA-283 [15]

Quantidade em percentagem de peso (%) em valores máximos				
Carbono	Manganês	Fósforo	Enxofre	Silício
0,14-0,27	0,90	0,035	0,04	0,40

A tabela indica a composição química do aço inoxidável SA-240:

Tabela 3.2 - Composição química do aço inoxidável SA-240 [15]

Quantidade em percentagem de peso (%) em valores máximos							
Carbono	Manganês	Fósforo	Enxofre	Silício	Crómio	Níquel	Azoto
0,08	2,00	0,045	0,030	0,75	18-20	8,0-10,5	0,10

O aço ao carbono SA-283 foi utilizado nos ensaios com os processos TIG e SER, enquanto que o aço inoxidável SA-240 apenas foi utilizado para o processo TIG.

3.4 Consumíveis

3.4.1 Processo SER

Neste processo foram utilizados eléctrodos de 3 famílias distintas: básicos, rutilicos e celulósicos, sendo sempre utilizado mais do que um eléctrodo básico.- Apresentam-se, seguidamente, as composições químicas destes eléctrodos. Para as classificações de eléctrodos E6010 (celulósico) não existem requisitos de composição química [16]. Na Tabela 3.3 indica-se a composição química do material fundido na soldadura com o eléctrodo revestido E7018.

Tabela 3.3 - Composição química do material depositado na soldadura com eléctrodos revestidos básicos segundo a especificação SFA-5.1 [17]

Quantidade em percentagem de peso (%) em valores máximos para os eléctrodos E7018 e E7018-1 ^{a)}								
Carbono	Manganês	Silício	Fósforo	Enxofre	Níquel	Crómio	Molibdénio	Vanádio
0,15	1,60	0,75	0,035	0,035	0,30	0,20	0,30	0,08
a) O sufixo 1 neste eléctrodo significa que o conteúdo de manganês se encontra muito próximo do máximo (1.60%)								

Tabela 3.4 indica-se a composição química do material fundido na soldadura com o eléctrodo revestido E6013.

Tabela 3.4 - Composição química do material depositado na soldadura com eléctrodos revestidos rutilicossegundo a especificação SFA-5.1[17]

Quantidade em percentagem de peso (%) em valores máximos para o eléctrodo E6013								
Carbono	Manganês	Silício	Fósforo	Enxofre	Níquel	Crómio	Molibdénio	Vanádio
0,20	1,20	1,00	N,D.	N,D.	0,30	0,20	0,30	0,08

3.4.2 Processo TIG

Para o processo TIG foram efectuados ensaios em aço inoxidável e em aço ao carbono, nas duas variantes manuais: com material de adição e sem material de adição. O gás utilizado foi 100% árgon, da série ARCAL, modelo 1, da Air Liquide. As tabelas seguintes indicam a composição química do cordão de soldadura com os materiais de adição. As Tabelas 3.5 e 3.6 indicam a composição química do material depositado na soldadura, com os consumíveis, segundo as especificações SFA 5.18 e 5.9, respectivamente.

Tabela 3.5 - Composição química do material depositado na soldadura de aço ao carbono com o consumível segundo a especificação SFA-5.18 [17]

Quantidade em percentagem de peso (%) em valores máximos para a vareta ER 70S-3									
Carbono	Manganês	Silício	Fósforo	Enxofre	Níquel	Crómio	Molibdénio	Vanádio	Cobre
0,06-0,15	0,90-1,40	0,45-0,75	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,50

Tabela 3.6 - Composição química do material depositado na soldadura de aço inoxidável com o consumível segundo a especificação SFA-5.9 [17]

Quantidade em percentagem de peso (%) em valores máximos para a vareta ER 316LSi									
Carbono	Crómio	Níquel	Molibdénio	Manganês	Silício	Fósforo	Enxofre	Azoto	Cobre
0,03	18,0-20,0	11,0-14,0	2,0-3,0	1,0-2,5	0,65-1,00	0,03	0,03	N.D.	0,75

3.5 Ensaios experimentais com SER

Com este processo realizaram-se cordões de soldadura com os parâmetros pré-definidos que possibilitassem a recolha de amostras das nanopartículas libertadas para posterior análise e caracterização.

Por cada ensaio, utilizou-se uma intensidade de corrente constante, inserida no módulo digital da máquina de soldadura, e com o auxílio de uma função nela existente, calculou-se, posteriormente, a tensão de arco média desse ensaio. Durante cada

Capítulo 3. Procedimento experimental

ensaio foi medido o tempo de soldadura com um cronómetro e, por fim, mediu-se o comprimento do cordão de soldadura.

Foram utilizados 4 tipos de eléctrodos, com espessuras diferentes, perfazendo um total de 6 eléctrodos. Cada ensaio teve uma réplica para se obterem dados mais consistentes. As Tabelas 3.7-3.10 descrevem o planeamento de ensaios para os diferentes eléctrodos revestidos.

Tabela 3.7 - Planeamento de ensaios para o eléctrodo 7018 no processo SER

Parâmetros				
Eléctrodo	Ensaio	Intensidade (A)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
E7018	1.1	140	4	350
	2.1	160		
	3.1	180		
	1.2	140		
	2.2	160		
	3.2	180		

Tabela 3.8 - Planeamento de ensaios para o eléctrodo 7018-1 no processo SER

Parâmetros				
Eléctrodo	Ensaio	Intensidade (A)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
E7018-1	1.1	70	2,5	350
	2.1	80		
	3.1	90		

	1.2	70		
	2.2	80		
	3.2	90		
	1.1	100	3,2	
	2.1	120		
	3.1	135		
	1.2	100		
	2.2	120		
	3.2	135		
	1.1	140	4,0	
	2.1	160		
	3.1	180		
	1.2	140		
	2.2	160		
	3.2	180		

Tabela 3.9 - Planeamento de ensaios para o eléctrodo 6013 no processo SER

Parâmetros				
Eléctrodo	Ensaio	Intensidade (A)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
E6013	1.1	70	4	350
	2.1	80		
	3.1	90		

	1.2	70		
	2.2	80		
	3.2	90		

Tabela 3.10 - Planeamento de ensaios para o eléctrodo 6010 no processo SER

Parâmetros				
Eléctrodo	Ensaio	Intensidade (A)	Espessura (mm)	Comprimento (mm)
E6010	1.1	80	3,2	350
	2.1	100		
	3.1	130		
	1.2	80		
	2.2	100		
	3.2	130		

A terminação “2”, em cada ensaio, corresponde à segunda réplica efectuada.

3.5.1 Recolha de amostras para medição com monitor de área de superfície de nanopartículas

A utilização deste monitor possibilita a obtenção das áreas de superfície das nanopartículas com capacidade de deposição nos pulmões, mais especificamente nos alvéolos.

As partículas, que se pretendem analisar, são as que têm capacidade de deposição alveolar e, por isso, o monitor foi colocado no modo (A), ou seja, no modo alveolar. Antes de se começar a fazer medições fez-se a calibração automática do equipamento.

As amostragens realizadas com este dispositivo foram definidas para serem efectuadas e registadas de 10 em 10 segundos, recorrendo ao *software* do equipamento. Este intervalo tem como objectivo evitar saturações do equipamento, dado que este pode analisar ambientes com grandes quantidades de partículas em suspensão.

A captura das nanopartículas, por via de um tubo ligado ao monitor, foi efectuada a partir do interior da máscara de soldadura, visto que, desta forma, as amostras recolhidas correspondam à atmosfera a que o soldador está sujeito. A Figura 3.7 ilustra o esquema de montagem da estação de soldadura.

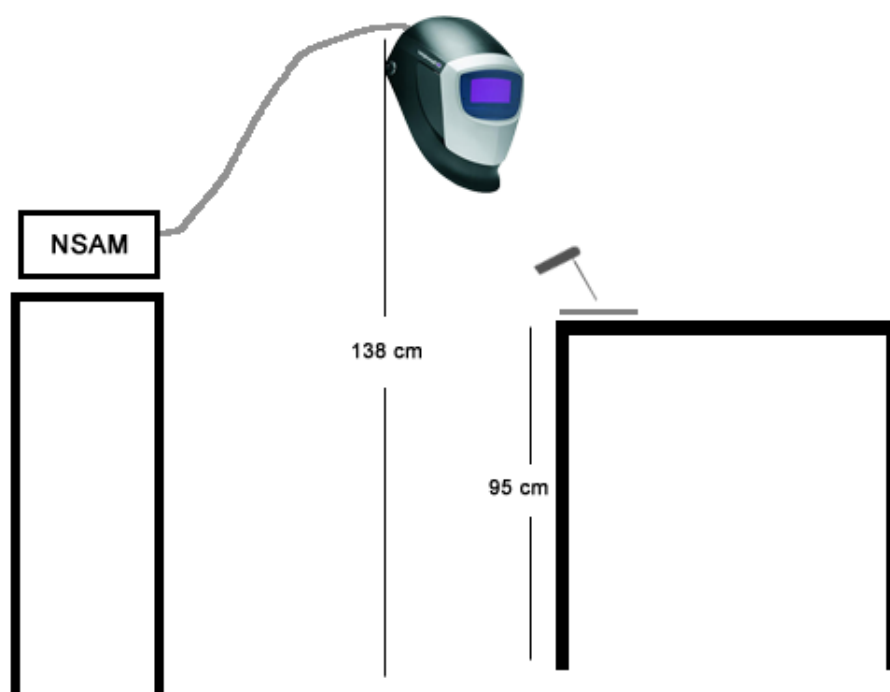


Figura 3.7 - Esquema de montagem da estação de soldadura para recolha de partículas com o NSAM

3.5.2 Recolha de amostras com o amostrador de aerossóis nanométricos para análise em TEM

Este equipamento foi utilizado conforme se indicou no capítulo 3.5.1, variando apenas no ponto de recolha, que, ao invés de ser colocado na máscara de soldadura, foi posicionado a uma distância constante de 20 cm da chapa utilizada, e a uma altura de 25 cm. O tubo utilizado para recolha de partículas foi suspenso num tubo de alumínio perfurado, com um suporte na parte inferior para, assim, manter constante a distância da chapa ao tubo.

Entre ensaios efectuados para cada família de eléctrodo foi substituída a grelha para análise posterior em microscopia electrónica. No que diz respeito aos parâmetros operacionais, foi utilizada uma tensão de, aproximadamente, -5 V e um fluxo de 2 l/min. A Figura 3.8 indica, esquematicamente, o ponto de recolha de nanopartículas com o amostrador de aerossóis nanométricos.

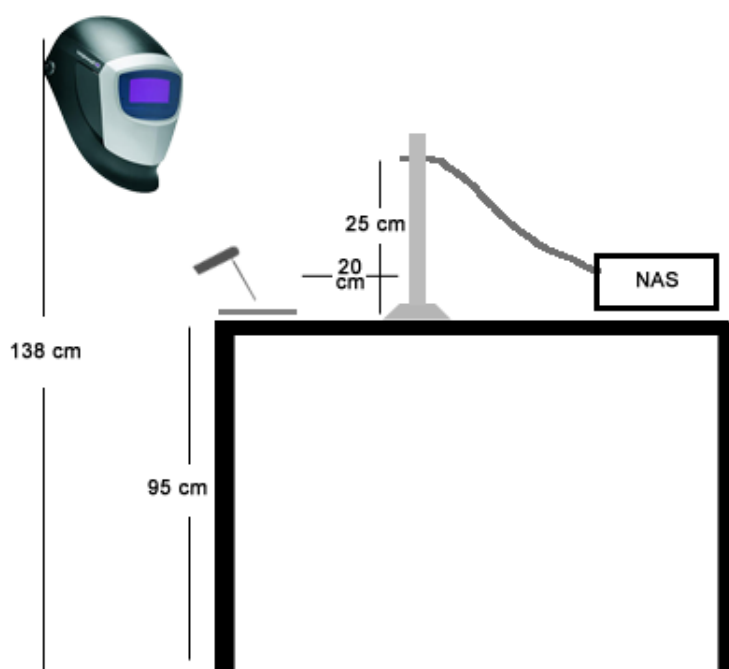


Figura 3.8 - Esquema de montagem da estação de soldadura para recolha de partículas com o NAS

As amostras recolhidas foram, posteriormente, analisadas por microscopia electrónica de transmissão (TEM), no Instituto Superior Técnico, com capacidade de efectuar também microanálise, por espectrometria de dispersão de energia de raios-X (EDS).

3.6 Ensaios experimentais com TIG

No processo de soldadura TIG, os cordões foram realizados manualmente, à semelhança do processo SER. Os ensaios tiveram como material de base e de adição aço inoxidável e aço carbono. Também foram efectuados ensaios sem material de adição.

Para cada ensaio foi estabelecida uma intensidade de corrente constante, fazendo o cálculo da tensão na máquina de soldadura, com uma função que efectua uma

média aritmética dos valores de tensão utilizados, para cada cordão de soldadura. Estabeleceu-se um tempo fixo para se obterem resultados o mais concordantes possíveis, dado que não existe um limite físico ao comprimento do cordão realizado sem material de adição. Seguidamente, mediu-se o comprimento do cordão.

A Tabela 3.11 representa o planeamento dos ensaios para TIG com aço ao carbono.

Tabela 3.11 - Planeamento de ensaios para o processo TIG com aço ao carbono

Parâmetros			
Ensaio	Material Base	Material de Adição	Intensidade (A)
1	Aço ao carbono	Aço ao carbono	75
			90
			110
2			75
			90
			110
1		Sem material de adição	75
			90
			110
2			75
			90
			110

A Tabela 3.12 representa o planeamento dos ensaios para TIG com aço inoxidável.

Tabela 3.12 - Planeamento de ensaios para o processo TIG com aço inoxidável

Parâmetros			
Ensaio	Material Base	Material de Adição	Intensidade (A)
1	Aço inoxidável	Aço inoxidável	75
			90
			110
2			75
			90
			110
1		Sem material de adição	75
			90
			110
2			75
			90
			110

3.6.1 Recolha de amostras para medição com monitor de área de superfície de nanopartículas

Tal como foi efectuado no processo SER, a recolha das nanopartículas foi feita a partir do interior da máscara de soldadura, com o intuito de se fazer uma análise na atmosfera a que o soldador está sujeito.

A Figura 3.9 representa, esquematicamente, a montagem da mesa de soldadura em que se indica, a posição do NSAM.

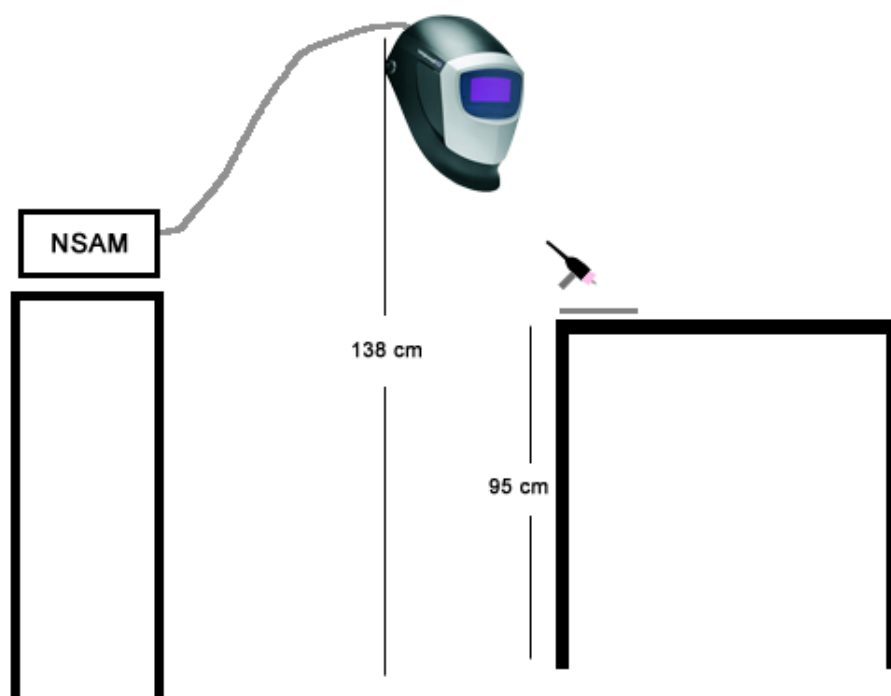


Figura 3.9 - Esquema de montagem da mesa de soldadura para recolha de nanopartículas com o processo TIG

3.6.2 Recolha de amostras com o amostrador de aerossóis nanométricos para análise em TEM

À semelhança do processo SER, a recolha das partículas foi efectuada a partir de uma distância de 20 cm da chapa, a 25 cm de altura. A troca de grelhas para análise em microscopia electrónica foi efectuada apenas uma vez, utilizando uma grelha para o aço ao carbono, e outra para o aço inoxidável.

A Figura 3.10 representa esquematicamente a montagem da mesa de soldadura para recolha de nanopartículas, indicando-se a posição do amostrador de aerossóis nanométricos para análise em TEM.

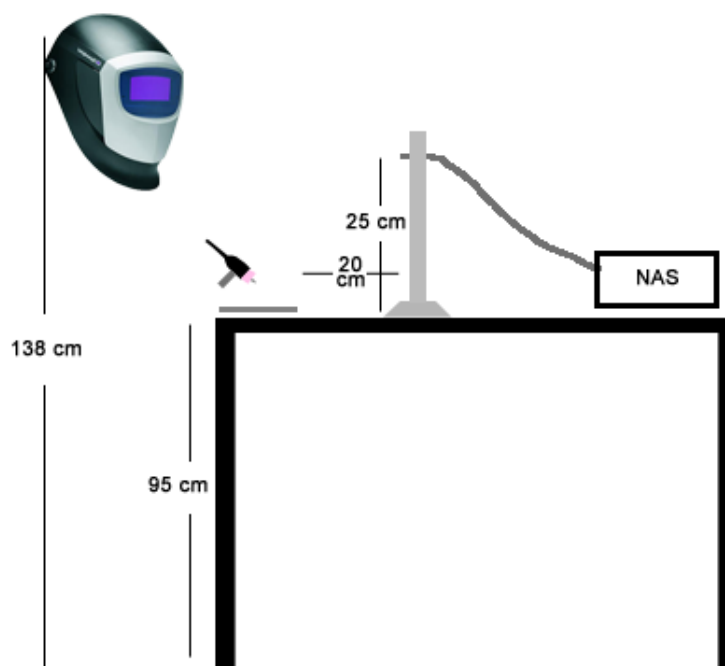


Figura 3.10 - Esquema de montagem da mesa de soldadura para recolha de nanopartículas para análise em TEM com o NAS

3.7 Conclusões

Com os parâmetros utilizados, foi possível fazer, posteriormente, o cálculo da velocidade de soldadura, que permite determinar a entrega térmica em cada cordão de soldadura, que é um parâmetro muito importante para a emissão de fumos e, por conseguinte, na emissão de nanopartículas.

Este procedimento possibilitou realizar as recolhas de partículas de uma forma sistemática para, mais tarde, poder vir a analisá-las.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados provenientes da recolha de amostras nos diversos ensaios. É neste capítulo que se quantificam as emissões de nanopartículas, e se procura relacionar estas com os parâmetros utilizados nos processos de soldadura.

4.2 Medições de nanopartículas no processo SER

No capítulo 3.5 foi descrito que a recolha de partículas foi efectuada mediante dois ensaios distintos para cada eléctrodo revestido. As medições realizadas pelo NSAM apresentam-se em gráficos que demonstram a variação das áreas de superfície das partículas por volume pulmonar segundo.

4.2.1 Eléctrodo 7018 com 4 mm de espessura

Para este ensaio foram utilizadas as seguintes intensidades de corrente: 140, 160 e 180 A, A Figura 4.1 apresenta os valores médios dos dois ensaios para as diferentes intensidades.

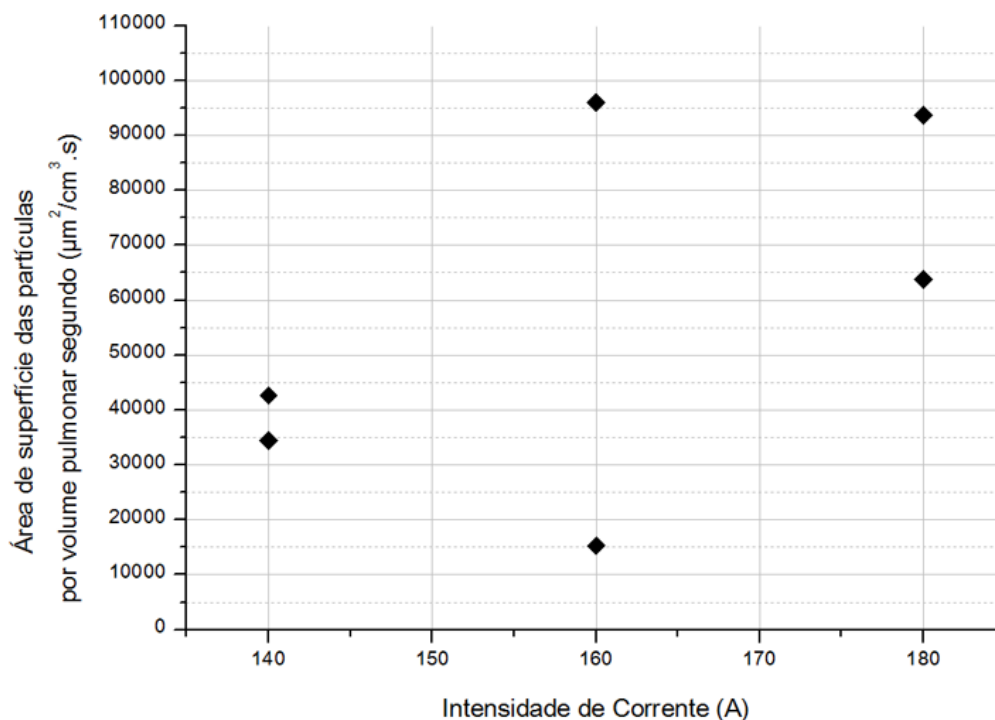


Figura 4.1 - Análise às nanopartículas libertadas no processo SER com o eléctrodo E7018 com 4mm de espessura

Para este eléctrodo e com estes parâmetros verifica-se que há uma grande dispersão na intensidade de 160 A, embora seja possível prever uma tendência crescente em função dos parâmetros. O valor máximo da área superficial de partículas com capacidade de deposição alveolar por cm^3 segundo de ar é $95982 \mu\text{m}^2$.

4.2.2 Eléctrodo 7018-1 com 2,5 mm de espessura

Para este ensaio foram utilizadas as seguintes intensidades de corrente: 70, 80 e 90 A, A Figura 4.2 apresenta os valores obtidos para as diferentes intensidades.

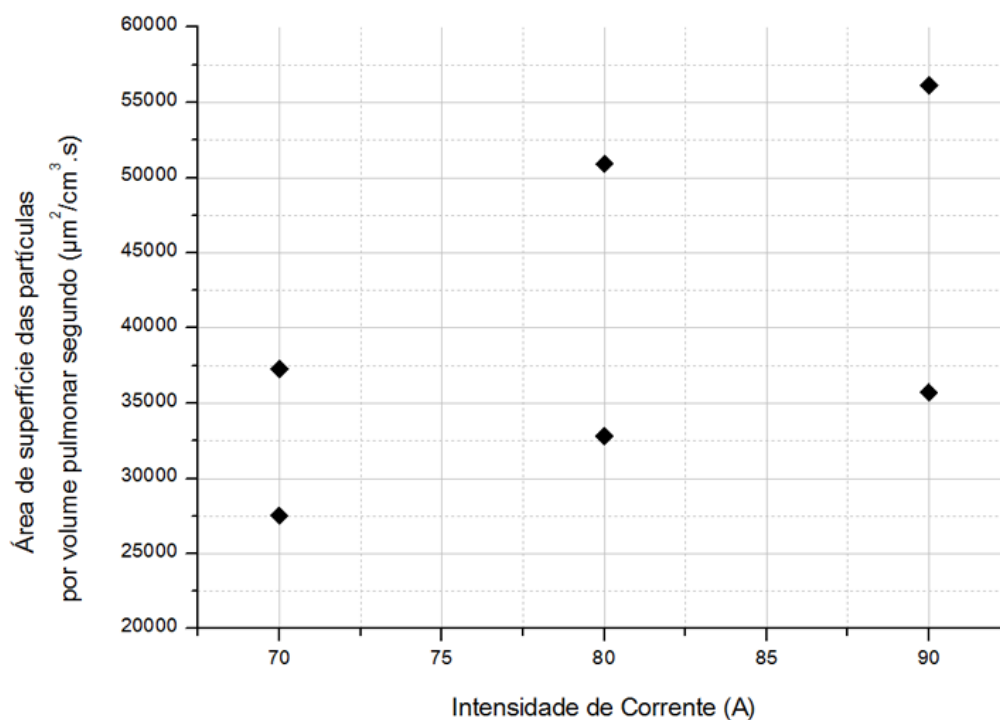


Figura 4.2 - Análise às nanopartículas libertadas no processo SER com o eléctrodo E7018-1 com 2,5 mm de espessura

Os valores obtidos apontam para uma tendência crescente da libertação de nanopartículas com o aumento da intensidade, assim como a dispersão que também tende a aumentar com o aumento dos parâmetros eléctricos. O valor máximo foi $56143 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$.

4.2.3 Eléctrodo 7018-1 com 3,2 mm de espessura

Os parâmetros de soldadura neste caso foram: 100, 120, 135 A, registando-se na Figura 4.3 os valores obtidos.

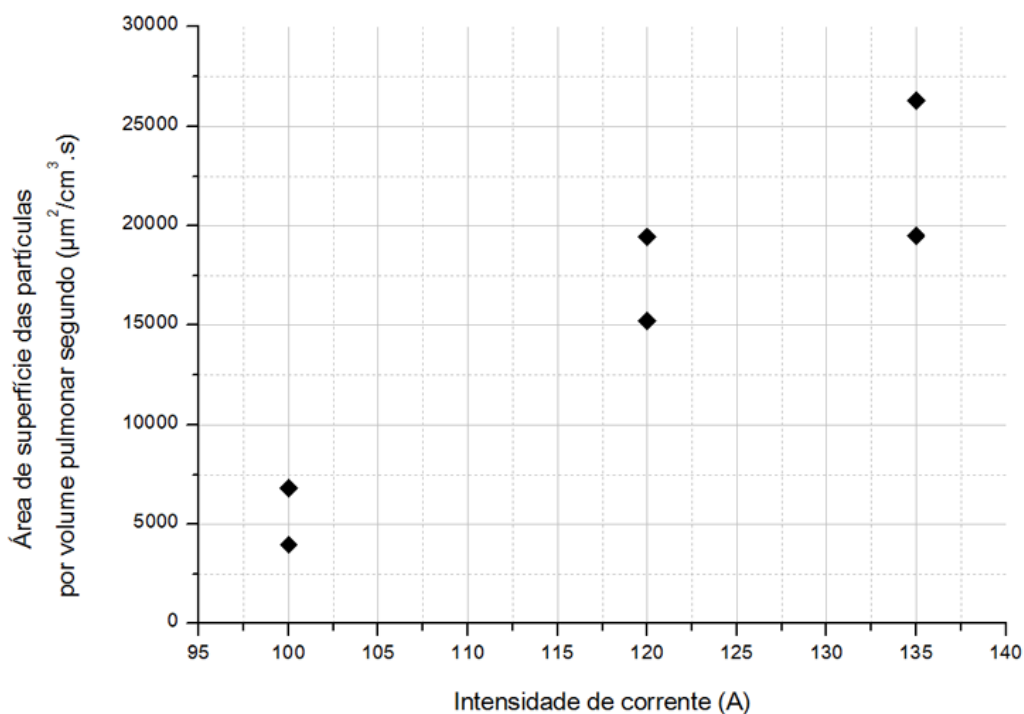


Figura 4.3 - Análise às nanopartículas libertadas no processo SER com o eléctrodo E7018-1 com 3,2 mm de espessura

Assim como o eléctrodo com espessura de 2,5 mm, o de 3,2 mm, com os valores que se apresentam na Figura 4.3, revelou uma tendência crescente em função da intensidade e, embora menos significativo do que no ensaio anterior, também se verifica um aumento da dispersão entre os valores à medida que se verifica o aumento dos parâmetros eléctricos. O valor máximo obtido foi $26295 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$.

4.2.4 Eléctrodo 7018-1 com 4 mm de espessura

Os parâmetros inseridos na máquina de soldadura para efectuar este ensaio foram: 140, 160, 180 A. A Figura 4.4 apresenta o gráfico dos valores obtidos.

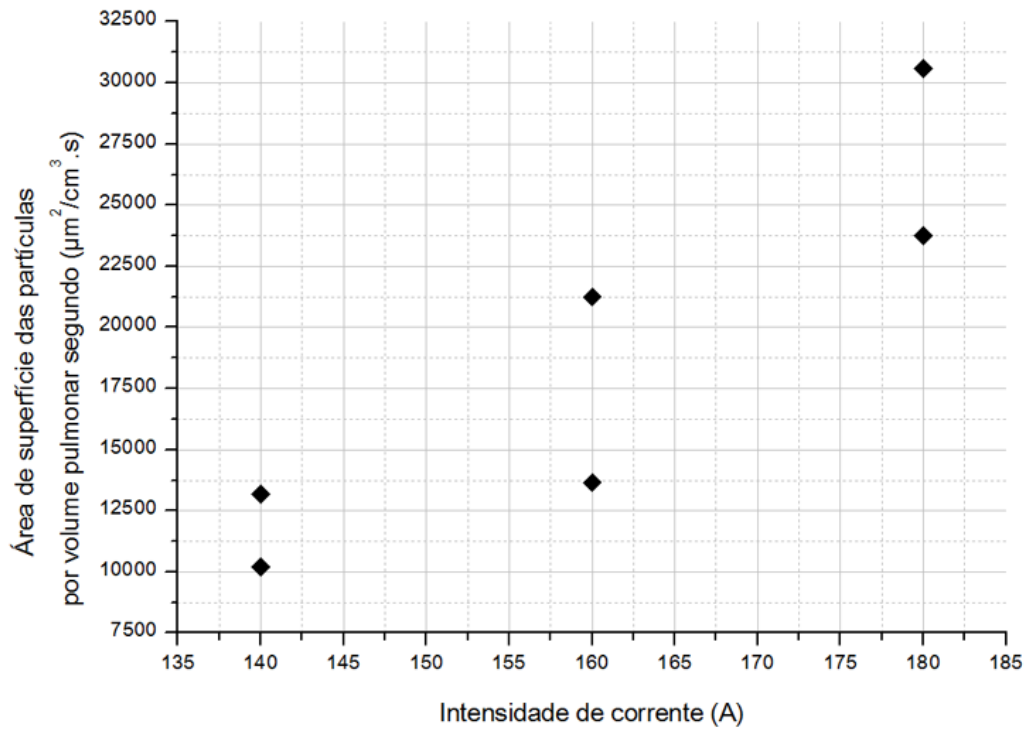


Figura 4.4 - Análise às nanopartículas libertadas no processo SER com o eléctrodo E7018-1 com 4 mm de espessura

Para o eléctrodo 7018-1 de 4 mm de espessura, a tendência crescente em função da intensidade da corrente mantém-se, assim como a dispersão entre os valores obtidos. O valor máximo obtido foi $30587 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$.

4.2.5 Eléctrodo 6013 com 2,5 mm de espessura

Os parâmetros inseridos na máquina de soldadura para efectuar este ensaio foram: 140, 160, 180 A. A Figura 4.5 representa o gráfico dos valores obtidos.

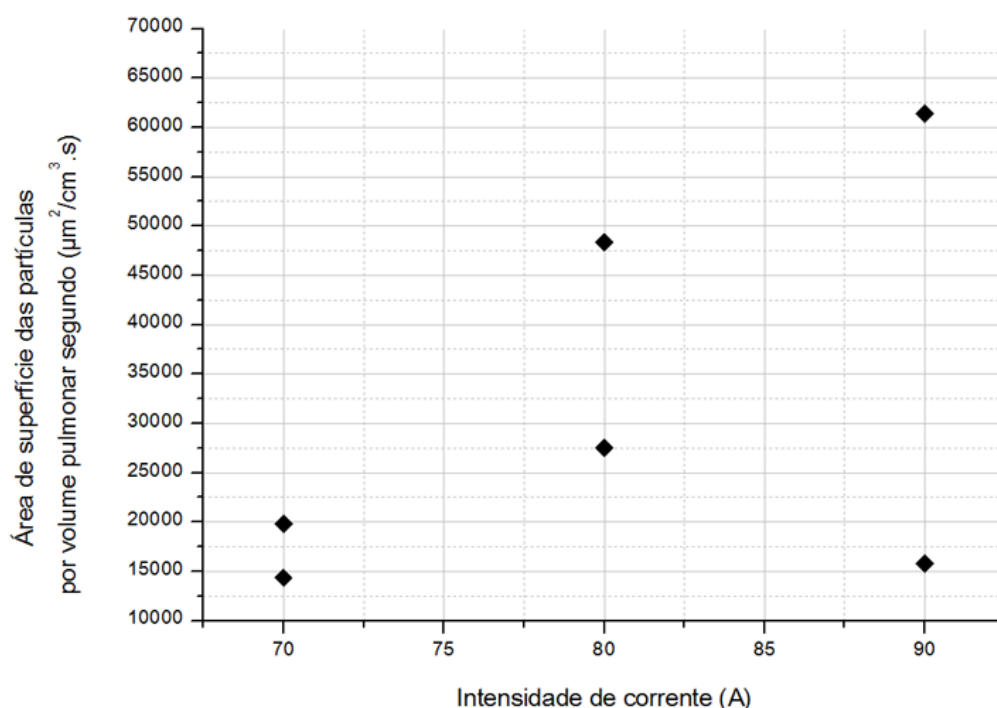


Figura 4.5 - Análise às nanopartículas libertadas no processo SER com o eléctrodo E6013 com 2,5 mm de espessura

Os valores obtidos na recolha de partículas com a soldadura com o eléctrodo 6013 também exibem a tendência crescente, embora tenham uma dispersão muito maior com a intensidade de 90 A, quando comparado com os outros valores. O valor máximo foi $61388 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$.

4.2.6 Eléctrodo 6010 com 3,2 mm de espessura

Não foi possível obter valores com este eléctrodo, visto que, ao fim do segundo ensaio, o dispositivo NSAM ficou saturado devido ao volume de partículas que este eléctrodo liberta, colocando o aparelho num estado de *charger flow rate high*, impedindo qualquer recolha de nanopartículas.

4.3 Medições de nanopartículas no processo TIG

No capítulo 3.6 foi descrito que a recolha de partículas foi efectuada mediante dois ensaios distintos para consumível, e ainda mais dois para cada ensaio sem material de adição, em cada um dos materiais de base. As medições realizadas pelo NSAM apresentam-se em gráficos que mostram a variação das áreas de superfície das partículas por volume pulmonar segundo.

4.3.1 Vareta consumível ER 70S-3

Para este consumível foram utilizadas 3 intensidades de corrente: 75, 90 e 110 A. Os valores obtidos para a área superficial de partículas com capacidade de deposição alveolar por cm^3 segundo encontram-se no gráfico da figura seguinte.

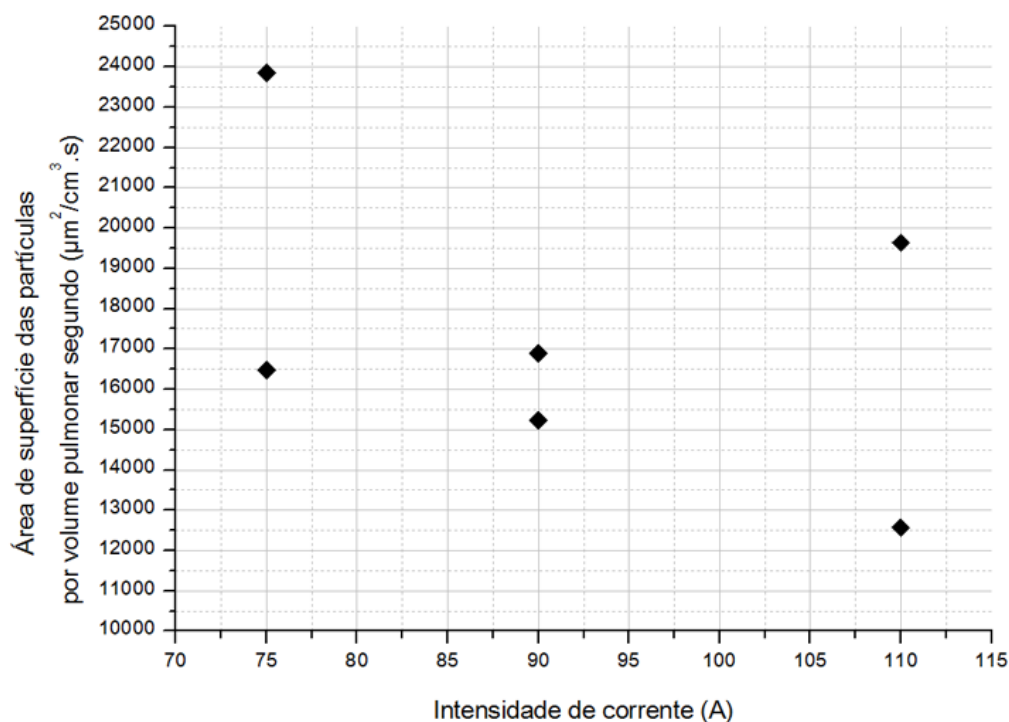


Figura 4.6 - Análise às nanopartículas libertadas no processo TIG com o consumível ER 70S-3 em aço ao carbono

Os valores obtidos, apesar de terem uma dispersão de cerca de 25% nos ensaios de 75 A, revelam uma tendência parabólica, onde o valor máximo atingido foi $23857 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$.

4.3.2 Vareta consumível ER 304LSi

Para este consumível foram utilizadas 3 intensidades de corrente: 75, 90 e 110 A. A Figura 4.7 apresenta graficamente os valores obtidos nos ensaios.

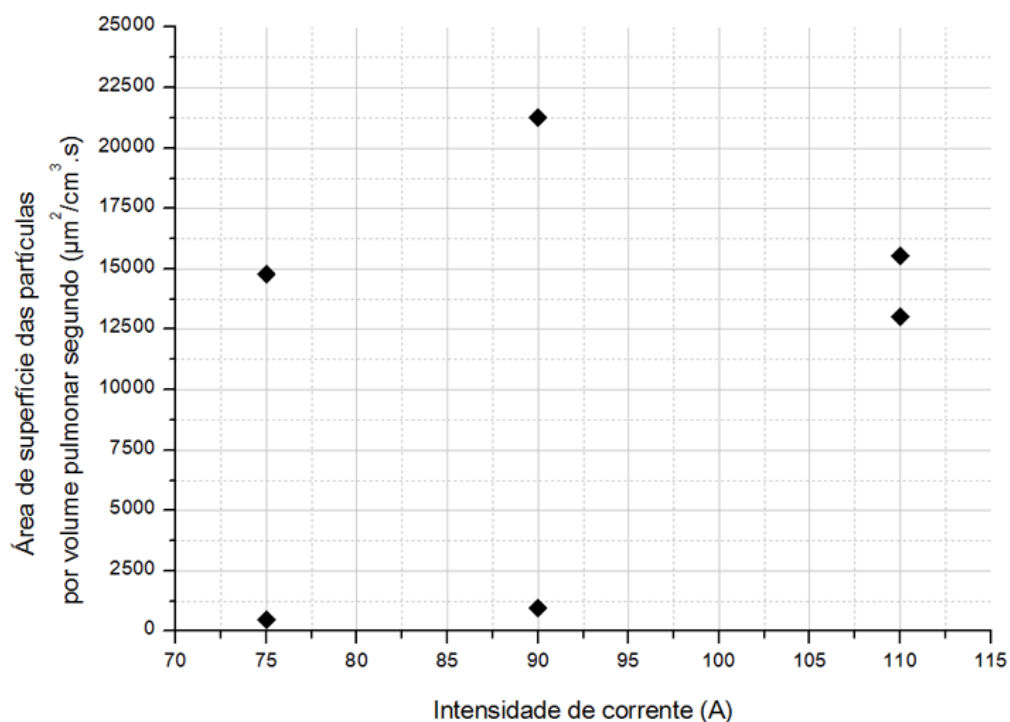


Figura 4.7 - Análise às nanopartículas libertadas no processo TIG com o consumível ER 304LSi em aço inoxidável

Este ensaio não revelou nenhuma espécie de tendência, dado que foram obtidos dois valores muito próximos de zero, e uma dispersão superior aos próprios valores. O valor máximo atingido foi $21271 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$.

4.3.3 Sem material de adição em aço ao carbono

Para o ensaio em TIG autogéneo em aço ao carbono foram utilizadas as seguintes intensidades de corrente: 75, 90 e 110 A. O gráfico da Figura 4.8 ilustra os valores obtidos.

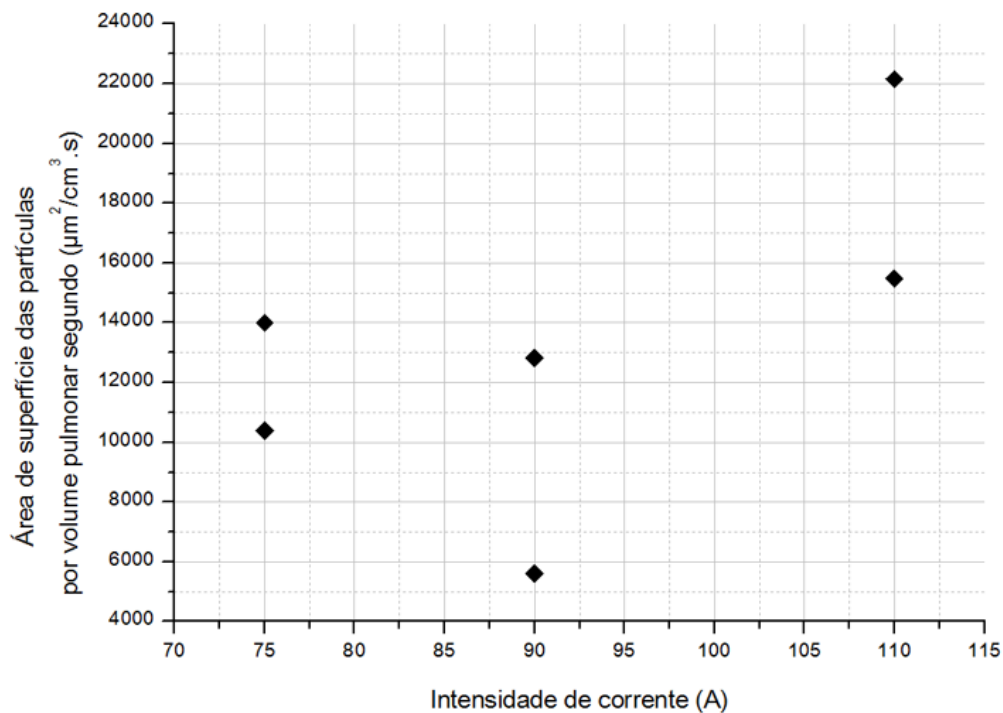
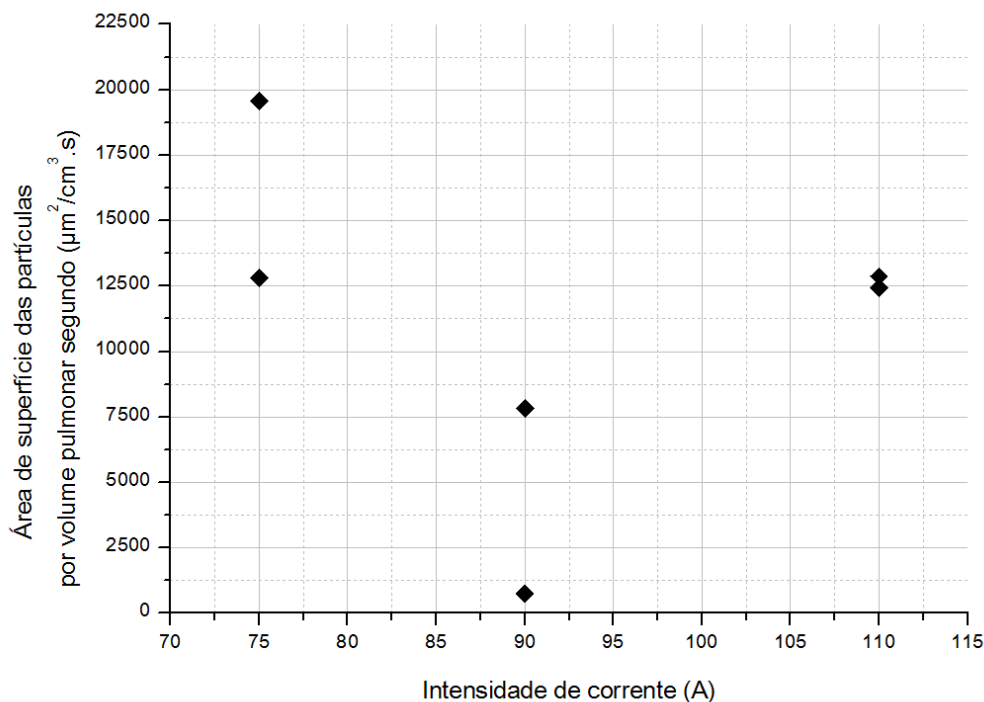


Figura 4.8 - Análise às nanopartículas libertadas no processo TIG sem material de adição em aço inoxidável

Os valores obtidos revelam uma tendência parabólica, e estes também exibem um aumento da dispersão nos valores mais altos. O valor máximo obtido foi de 22149 $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$.

4.3.4 Sem material de adição em aço inoxidável

Para o ensaio em TIG autogêneo, em aço inoxidável, foram utilizadas as seguintes intensidades de corrente: 75, 90 e 110 A. O gráfico da figura ilustra os valores obtidos.



Os valores obtidos do ensaio de aço inoxidável em TIG autogéneo apresentam uma tendência parabólica, apesar dos ensaios de intensidades mais elevadas terem uma dispersão menor que os de mais baixas intensidades. O valor máximo atingido foi de $19562 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$.

4.4 Resultados da análise por microscopia

Com o equipamento de recolha de amostras NAS, obtiveram-se amostras das partículas emitidas nos diversos processos de soldadura, o que tornou possível a sua análise química e morfológica.

4.4.1 Análise química das partículas recolhidas na soldadura SER

A Figura 4.9 apresenta o resultado de uma microanálise por espectrometria de energia de raios-X às partículas da amostra recolhida no processo SER com o eléctrodo E7018-1.

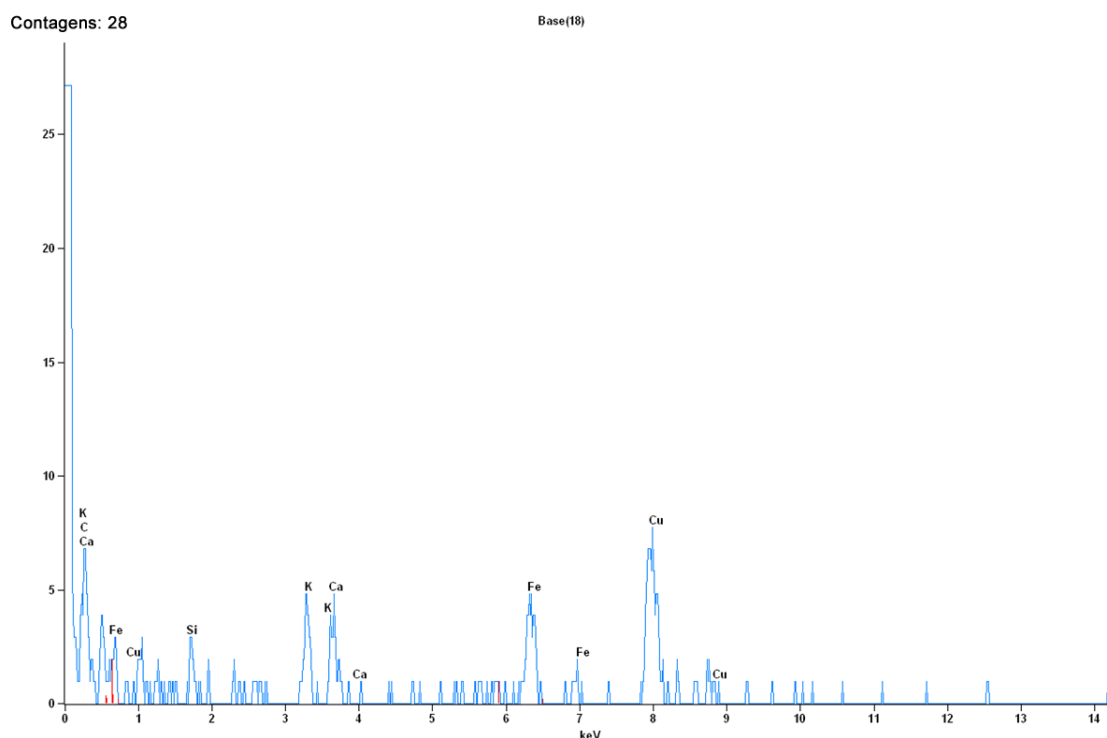
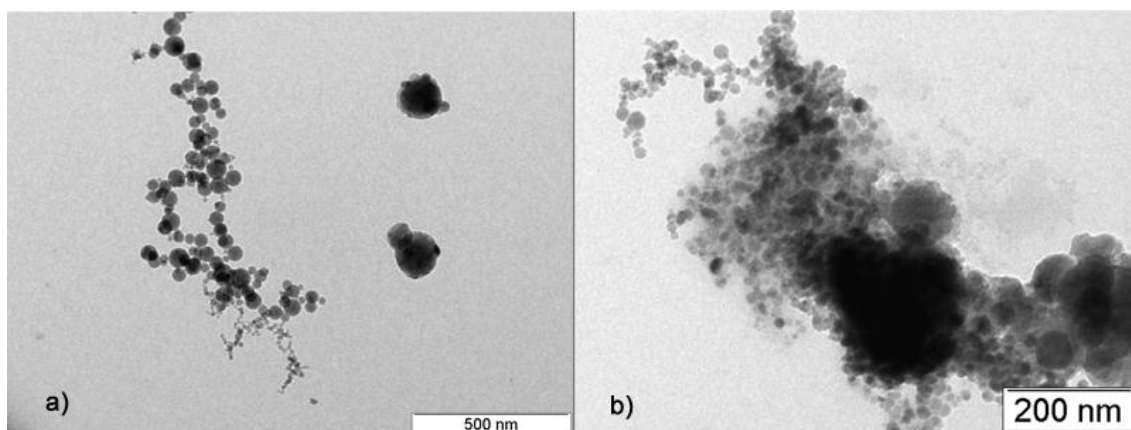


Figura 4.9 - Análise EDS para a amostra recolhida após soldadura com o processo SER e o eléctrodo E7018-1

Os elementos que foram identificados como tendo sido libertados na soldadura são ,maioritariamente,o ferro, constituinte da alma metálica do eléctrodo, e os elementos do revestimento básico como o cálcio, e o potássio. O silício também é um elemento comum nos revestimentos, tendo como função a formação de escória. O elemento cobre presente na Figura 4.9 é correspondente ao material constituinte da grelha para recolha de partículas, não sendo, por isso, significativo.

4.4.2 Análise morfológica das partículas recolhidas na soldadura SER

Para que ocorra a deposição nos alvéolos pulmonares, uma das propriedades das nanopartículas mais importantes é a sua forma. A Figura 4.10 apresenta as imagens obtidas no microscópio electrónico de transmissão para o processo de soldadura SER com o eléctrodo E7018-1.



**Figura 4.10 - Imagens capturadas em TEM de nanopartículas libertadas com o processo de soldadura SER com o eléctrodo E7018-1,
a) Partículas à escala de 500nm, b) Partículas à escala de 200 nm.**

Da Figura 4.10 verifica-se que as partículas se encontram sob a forma de aglomerados, sem nenhum tipo de estrutura interna ou fronteira bem delimitada, pelo que se pode afirmar que são amorfas. As partículas atingem dimensões na gama dos 10 a 100 nm, ou seja, de acordo com a Figura 2.6, são estas as partículas com maior capacidade de deposição alveolar.

4.4.3 Análise química das partículas recolhidas no processo TIG

A Figura 4.11 apresenta o resultado de uma microanálise por espectrometria de energia de raios-X às partículas da amostra recolhida no processo TIG com material de adição de especificação ER 70S-3.

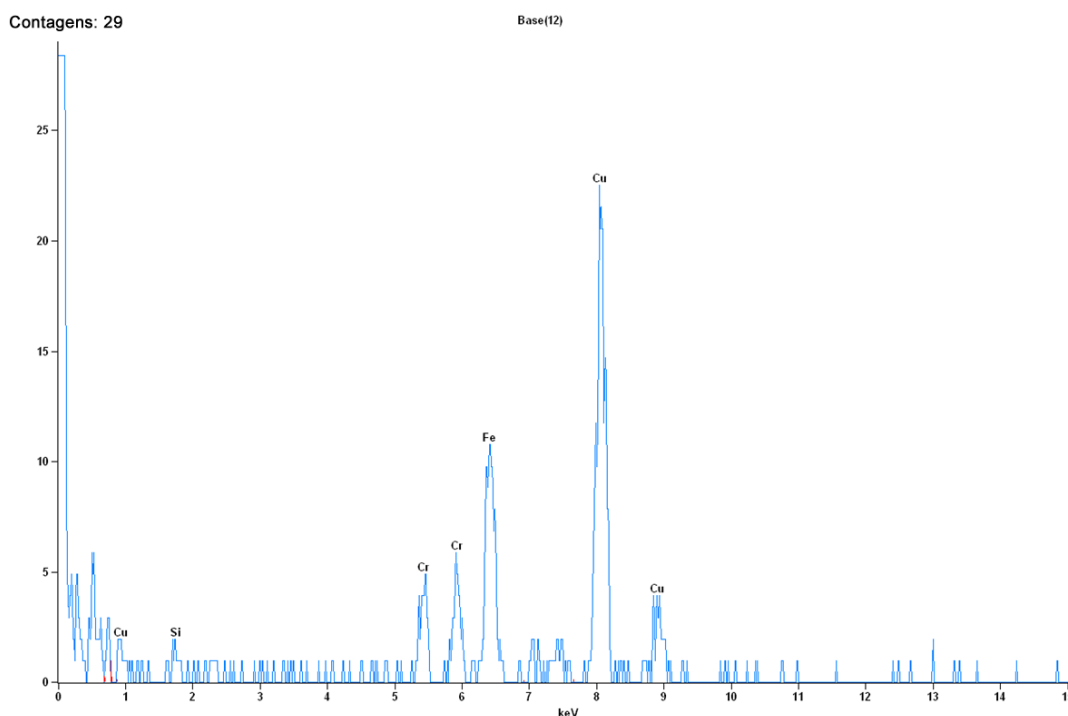


Figura 4.11 - Análise EDS para a amostra recolhida após soldadura com o processo TIG e o consumível ER 70S-3

Na análise à amostra de TIG em aço carbono verificam-se dois picos que correspondem a crómio, que possivelmente tem origem numa contaminação do ambiente onde as nanopartículas foram recolhidas. O elemento predominante é o ferro, e também se destaca o silício, que se encontra nos materiais de adição com a função de desoxidante.

A Figura 4.12 apresenta o resultado de uma microanálise por espectrometria de energia de raios-X às partículas da amostra recolhida no processo TIG com material de adição com a especificação ER 304LSi.

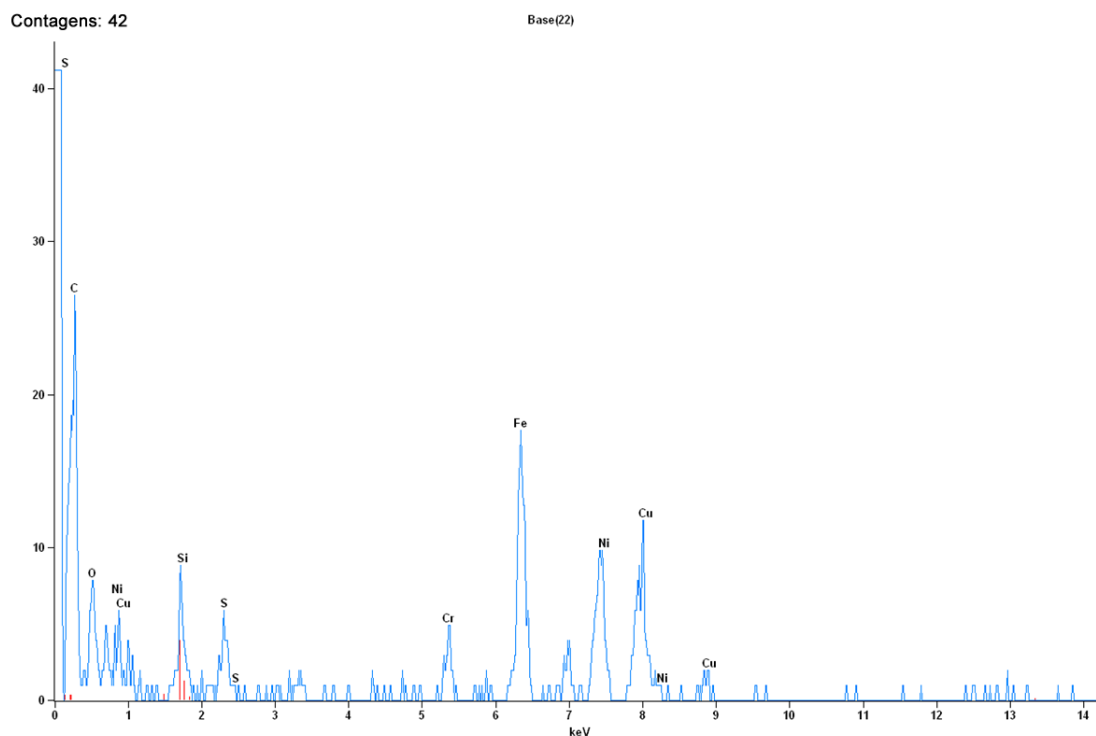


Figura 4.12 - Análise EDS para a amostra recolhida após soldadura com o processo TIG e o consumível ER 304Lsi

Foram identificados vários elementos químicos, tais como o níquel e o crómio, que dão a característica inoxidável ao aço, assim como o silício proveniente, predominantemente, do material de adição. A existência de impurezas como o enxofre poderá ter origem em contaminações da atmosfera, ou no próprio material de base. O elemento com maior expressão é o ferro.

4.4.4 Análise morfológica das partículas recolhidas no processo TIG

Na Figura 4.13 apresentam-se três imagens resultantes da análise por microscopia electrónica de transmissão, à amostra recolhida com o amostrador de aerossóis nanométricos após utilização do processo de soldadura TIG com consumível ER 70S-3 em aço ao carbono.

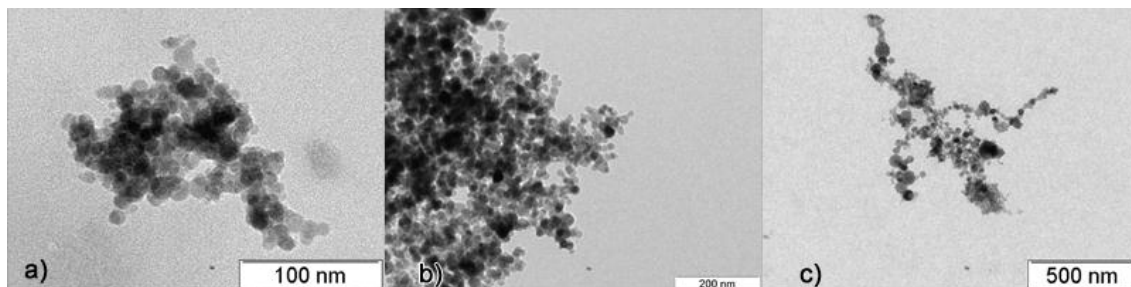


Figura 4.13 - Imagens capturadas em TEM de nanopartículas libertadas com o processo de soldadura TIG com o consumível ER 70S-3 em aço ao carbono, a) Escala de 100 nm, b) Escala de 200 nm, c) Escala de 500 nm

As partículas analisadas, por microscopia electrónica de transmissão, resultantes do processo TIG, apresentam dimensões dentro da gama de 10 a 100 nm, embora estas sejam inferiores às observadas no processo SER. As partículas encontram-se sob a forma de aglomerados, sem nenhum tipo de estrutura interna ou fronteira bem delimitada, indicando mais uma vez que são amorfas.

Na figura seguinte as duas imagens apresentadas resultam da análise em TEM à amostra recolhida com o dispositivo NAS durante a soldadura com o processo TIG e consumível ER 304LSi em aço inoxidável.

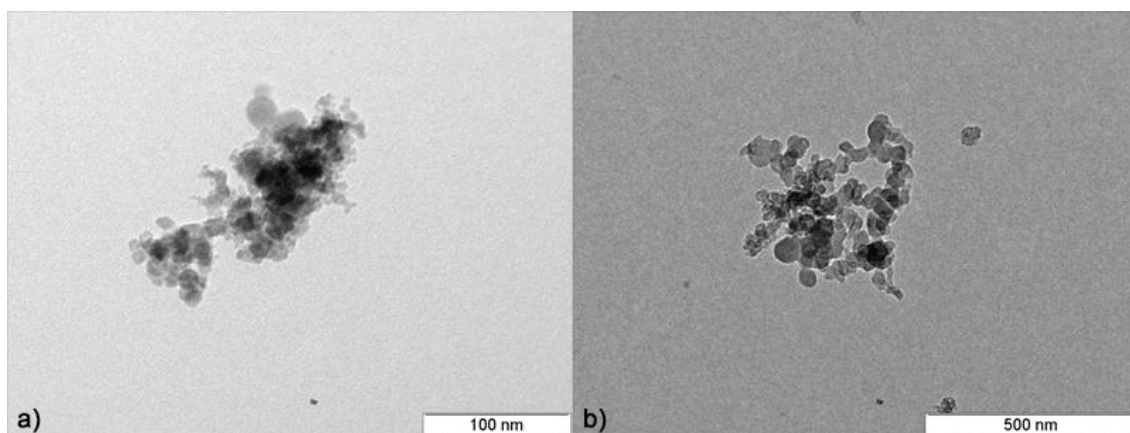


Figura 4.14 - Imagens capturadas em TEM de nanopartículas libertadas com o processo de soldadura TIG com o consumível ER 304LSi em aço inoxidável, a) Escala de 100 nm, b) Escala de 500 nm

As partículas analisadas para o processo TIG com aço inoxidável apresentam, à semelhança das outras amostras, partículas amorfas de forma aproximadamente esférica, dispostas sob a forma de aglomerados.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHO FUTURO

Do trabalho efectuado é possível concluir que:

- Existem grandes concentrações de nanopartículas, com capacidade de deposição alveolar, que são emitidas durante a execução dos processos de soldadura por fusão, em análise - soldadura por eléctrodos revestidos e TIG.
- Para o processo SER verificou-se, que a utilização de parâmetros eléctricos de valores mais elevados, originava uma maior libertação de nanopartículas, com uma tendência quase linear.
- No processo TIG, a área superficial de partículas com capacidade de deposição alveolar por cm^3 , não revelou a existência de uma relação linear com o aumento dos parâmetros eléctricos, o que pode ir em linha de conta com o que se apresenta na Figura 2.1. A potência do arco eléctrico, em TIG, não aumenta de forma linear como no processo SER ou MIG, nem decresce como no processo SAS. Os ensaios com o processo TIG revelaram, praticamente todos, que as intensidades de corrente intermédias reduziam a libertação de nanopartículas para a atmosfera.

- Não se conseguiu estabelecer uma correlação precisa entre a quantidade de nanopartículas libertadas e a natureza dos diferentes materiais de base no processo TIG, observando-se valores máximos na ordem dos $20000 \mu\text{m}^2/\text{cm}^3\text{s}$.
- Não se conseguiu estabelecer uma relação quantitativa entre a geração de nanopartículas e os diferentes revestimentos, ou espessuras de eléctrodos, no processo SER. No entanto, o eléctrodo celulósico E6010 provou ser o consumível que resulta numa maior libertação de nanopartículas, o que poderá dever-se à presença de uma grande quantidade de compostos orgânicos no seu revestimento.
- O aumento dos valores dos parâmetros eléctricos provocou, na maior parte dos ensaios efectuados, uma maior dispersão entre os valores de cada réplica.
- Em processos manuais a tensão de arco é muito variável devido à dificuldade em controlar a sua altura, e o aumento ou diminuição desta pode ser responsável pela grande dispersão observada.
- O processo TIG, considerado na indústria como um processo “limpo”, revelou valores significativos de emissão de nanopartículas, em alguns casos, maior do que em SER.
- Da análise química à natureza das nanopartículas emitidas com o processo SER, por EDS, identificaram-se picos de elevada intensidade para partículas constituintes do revestimento básico, tais como o cálcio, potássio e o silício, assim como o ferro, elemento que é o principal constituinte da alma do eléctrodo. No processo TIG identificaram-se picos dos principais elementos constituintes de um aço inoxidável austenítico, tais como o cromo, níquel, ferro e silício, assim como um pico intenso de enxofre, que poderá ser originado pela existência de uma zona, do material de base, com um elevado teor deste elemento. No aço ao carbono verificou-se uma contaminação de cromo, possivelmente com origem no aço inoxidável ensaiado também neste estudo, visto que os ensaios foram realizados na mesma data. Num ambiente industrial, onde se efectuem soldaduras de diferentes materiais de base em simultâneo, os soldadores podem estar sujeitos a nanopartículas libertadas de processos que eles próprios não estão a utilizar, e deve ser tomado em consideração do ponto de vista da saúde dos operadores.

- A análise morfológica revelou a presença de partículas com dimensões inferiores a 100 nm, ou seja, com grande eficiência de deposição nos alvéolos pulmonares. Este é outro factor que pode contribuir para afectar a saúde do soldador.
- A elevada dispersão dos valores poderá estar relacionada com o facto da recolha de nanopartículas ter sido feita a partir do interior da máscara de soldadura, em que a atmosfera é diferente da exterior onde estão em suspensão uma maior quantidade de nanopartículas.

Para trabalhos futuros nesta temática, seria importante fazer uma avaliação da concentração de partículas com maior ênfase nos efeitos que variadas combinações de intensidades de corrente, e tensões de arco, possam causar, medindo estes dois parâmetros com dispositivos apropriados.

Para obter melhores efeitos no processo TIG poderia utilizar-se uma mecanização do processo por forma a serem obtidos resultados mais consistentes, assim como efectuar soldaduras noutros materiais tais como as ligas de níquel e de alumínio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. F. O. Santos and L. Quintino. *Processos de Soldadura*. ISQ1999.
- [2] A. D. Althouse, C. H. Turnquist, W.A. Bowditch, K.E. Bowditch and M.A Bowditch. *Modern Welding*. Illinois: The Goodheart-Willcox Company, Inc.; 2004.
- [3] J. Gomes, C. Guerreiro, D. Lavrador, P.A. Carvalho and R.M. Miranda. *TEM analysis as a tool for toxicological assessment of occupational exposure to airborne nanoparticles from welding*. Microscopy and Microanalysis; vol. 19, pp., 2012.
- [4] J.M. Antonini, S. Stone, J.R. Roberts, B. Chen, D. Schwegler-Berry, A. Afshari and D.G. Frazer. *Effect of short-term stainless steel welding fume inhalation exposure on lung inflammation, injury, and defense responses in rats*. Toxicol Appl Pharmacol; vol. 223, pp. 234–245, 2007.
- [5] T. Wittczak, J. Walusiak and C. Palczynski. *Welding-related respiratory diseases*. Med Pr; vol. 60, pp. 201–208, 2009.
- [6] J. M. Antonini, M. D. Taylor, A. T. Zimmer and J. R. Roberts. *Pulmonary responses to welding fumes: Role of metal constituents*. Journal of Toxicology and Environmental Health-Part a-Current Issues; vol. 67, pp. 233-249, 2004.
- [7] I. Pires, L. Quintino, R. Miranda and J. Gomes. *Fume emissions during gas metal arc welding*. Toxicological & Environmental Chemistry; vol. 88(3), pp. 385-394, 2006.
- [8] J. F. Gomes, P. C. Albuquerque, R. M. Miranda and M. T. Freire. *Determination of Airborne Nanoparticles from Welding Operations*. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A: Current Issues, 75:13-15; vol., pp. 747-755, 2012.
- [9] <http://www.lenntech.com/periodic/periodic-chart.htm>, acedido em 26-08-2013
- [10] L. Matos, P. Santos and F. Barbosa. *As Nanopartículas em Ambientes Ocupacionais*. Revista Segurança; vol. 202, pp. 10-14, 2011.
- [11] S. Escala, M. Nooij and L. Quintino, *Economically Welding in a Healthy Way*, presented at the 1st IIW South - East European Welding Congress, Romania, 2006
- [12]
http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Spec_Sheets/3550_PN2980333_US-web.pdf, acedido em 30-08-2013
- [13]
http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Spec_Sheets/3089.pdf, acedido em 30-08-2013
- [14] http://rnme.up.pt/index_3_pt.htm, acedido em 30-08-2013
- [15] American Society of Mechanical Engineers. *ASME II Boiler and Pressure Vessel Code Part A: Ferrous Material Specifications*2010.
- [16] http://www.esabna.com/EUWeb/AWTC/Lesson3_10.htm, acedido em 01-09-2013

[17] American Society of Mechanical Engineers. *ASME II Boiler and Pressure Vessel Code Part C: Specifications for Welding Rods, Electrodes and Filler Metals* 2010.